

**Titre:** Résistance à la fissuration sous contraintes des soudures des géomembranes polyéthylène haute densité  
**Title:**

**Auteur:** Abdessalem Yezza  
**Author:**

**Date:** 2001

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Yezza, A. (2001). Résistance à la fissuration sous contraintes des soudures des géomembranes polyéthylène haute densité [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6973/>  
**Citation:**

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/6973/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:**  
**Advisors:**

**Programme:** Non spécifié  
**Program:**

## **NOTE TO USER**

**This reproduction is the best copy available.**

UMI



**UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL**

**RÉSISTANCE À LA FISSURATION SOUS CONTRAINTES DES SOUDURES  
DES GÉOMEMBRANES POLYÉTHYLÈNE HAUTE DENSITÉ**

**ABDESSALEM YEZZA**

**DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES**

**(GÉNIE CIVIL)**

**JUIN 2001**

**©Abdessalem Yezza, 2001.**





**National Library  
of Canada**

**Acquisitions and  
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

**Bibliothèque nationale  
du Canada**

**Acquisitions et  
services bibliographiques**

**395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada**

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

**The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.**

**The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.**

**L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.**

**L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.**

**0-612-65595-4**

**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

RÉSISTANCE À LA FISSURATION SOUS CONTRAINTES DES  
SOUDURES DES GÉOMEMBRANES POLYÉTHYLÈNE HAUTE DENSITÉ

présenté par : YEZZA Abdessalem

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise és sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LAFLEUR Jean, Ph.D., président

M. SOULIÉ Michel, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. MLYNAREK Jacek, D.Sc.A., membre et codirecteur de recherche

M. MARCOTTE Michel, M.Sc.A., membre

*Pour ma mère, mon père,  
ma sœur, mes frères,  
mes oncles, mes tantes,  
mes cousins, mes cousines,  
et à tous ceux qui me valent cher et qui se reconnaîtront.*

## REMERCIEMENTS

C'est avec un réel plaisir que je réserve ces lignes en reconnaissance à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Je tiens à remercier vivement mes directeurs de recherche, Professeur Soulié et Professeur Mlynarek, qui n'ont cessé de me prodiguer leurs conseils judicieux et leurs suggestions pertinentes. Je leur dois une particulière reconnaissance pour l'intérêt qu'ils ont accordé à mon projet. Tout particulièrement, je tiens à remercier Monsieur Jacek Mlynarek pour m'avoir confié ce sujet et entrepris les démarches nécessaires pour réaliser cette maîtrise.

Mes remerciements vont ensuite à monsieur Pierre Sarazin, étudiant en doctorat en département de génie chimique à l'École Polytechnique de Montréal, pour son aide précieuse et ses judicieux conseils.

J'exprime mes vives reconnaissances à l'équipe du centre des technologies géosynthétiques, Sageos à Saint-Hyacinthe pour son accueil et son aide, particulièrement Jacek Mlynarek, Olivier Vermeersch, Eric Blond, Liette Courchesne, Martin Bouthot et Dominique Kay. Par ailleurs, cette étude a été possible grâce au soutien de Sageos, qui a fourni l'ensemble du matériel utilisé dans cette recherche : géomembranes, banc d'essai et les divers outils d'analyse.

Finalement, mes remerciements s'adressent aussi au Conseil de Recherche en Sciences naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) qui a partiellement financé ce projet par le biais du programme d'appui aux professeurs universitaires.

## RÉSUMÉ

Le soudage de géomembranes PEHD est une étape indispensable dans la conception d'une étanchéisation. D'une part, une seule feuille ne suffit pas à recouvrir le site. D'autre part, aucune alternative satisfaisante n'a vu le jour pour lier les feuilles entre elles à grande échelle. Cette opération change la microstructure du polymère et son orientation dans la partie portée à fusion. En effet, elle introduit des discontinuités géométriques dans la barrière d'étanchéité. Ces dernières concentrent des contraintes et sont souvent liées aux conditions de soudage, à savoir la température de l'élément chauffant, la vitesse du soudage et la pression appliquée. Ces contraintes résiduelles causées par l'opération de soudage ainsi que les sollicitations dynamiques des feuilles de géomembranes soudées, sont sans doute à l'origine des fissures observées à proximité des joints.

Précédemment, Sarazin (1998) a évalué l'influence des conditions de soudage d'une machine de soudage particulière sur la qualité des soudures. Ses travaux avaient porté sur les essais mécaniques destructifs (cisaillement et pelage) et des essais thermiques par DSC, sans pouvoir distinguer entre les différentes soudures. Notre étude et ses objectifs se situent dans la continuité de ces travaux, à savoir distinguer entre les différentes soudures, au moyen de l'essai de fissuration sous contrainte. Cet essai consiste à mesurer la résistance d'un matériau à la fissuration sous charge constante dans un environnement chimique.

La revue de littérature a permis d'étudier le mécanisme et les différents essais utilisés antérieurement pour la caractérisation de la fissuration sous contraintes des soudures doubles par fusion et de géomembranes. En définitive, notre programme de recherche et ses résultats se décomposent en trois thématiques.

En premier lieu, le développement d'une version accélérée de l'essai de fissuration standard a été conduit. Le facteur d'accélération optimal est de l'ordre de 7 par rapport à l'essai ASTM D5397. Ce développement a notamment nécessité la conception et la construction d'un nouveau banc d'essais et d'une machine à entailles.

Dans un second temps, nous avons procédé au développement d'une nouvelle procédure d'essai de résistance à la fissuration sous contraintes des soudures de géomembranes PEHD. La nouvelle procédure comprend les paramètres d'essai suivants : échantillons préparés au moyen de l'emporte pièce ASTM D638 type IV et entaillés sur 30% de profondeur; application sous 5MPa dans un bain d'IGEPAL CA 720 à 70°C.

Finalement, nous avons appliqué l'essai cité précédemment sur des soudures réalisées en laboratoire par Sarazin (1998). Les résultats obtenus ont permis de démontrer la pertinence de cet essai pour distinguer entre les différentes conditions de soudage et donc d'évaluer la résistance à la fissuration des soudures doubles par fusion. Les résultats démontrent notamment l'inaptitude de l'essai de pelage à prédire la résistance à long terme des soudures : les soudures sur-pressées et surchauffées jugées adéquates par l'essai de pelage présentent une résistance à la fissuration sous contraintes médiocre.

Des travaux complémentaires sont requis pour confirmer la reproductibilité de l'essai développé sur d'autres soudures issues de joints produits avec d'autres machines ou prélevés sur sites, et éventuellement l'exploiter dans les programmes d'assurance et de contrôle qualité.

## ABSTRACT

Welding of HDPE geomembrane is an inevitable stage in the design of landfill. On the one hand, one single sheet is not enough to cover the site, on the other hand, there is no satisfactory alternative available to join sheet on large scale. Welding changes the microstructure of the polymer and its orientation in the fused area. Indeed, it introduces geometrical discontinuities in the lining system. These discontinuities concentrate constraint in their vicinity and are often dependant of the welding conditions, namely the temperature of the hot edge, the speed of welding and applied pressure. The residual stresses caused by this operation as well as the solicitations of welded sheet, are undoubtedly responsible of cracks observed near the joints.

Sarazin (1998) has evaluated the influence of the welding conditions of specified welding machine on the quality of seams. This work includes analysis of destructive mechanical test (shear and peel) and thermal tests by DSC. He could not identify any difference in the behavior between the various seams. Our study and its objectives are in the continuity of this work. We will try to use the stress cracking test to identify differences in behavior of the seams. This test consists in the measurement of the resistance of material to cracking under constant load in a chemical environment.

The literature review allowed to study the mechanism of stress cracking as well as various tests used for the characterization of stress cracking resistance (SCR) of double track fusion seams and geomembrane sheet. In result, our research program is divided in three thematic.

In a first stage, the development of an accelerated version of standard Stress Cracking test was performed. The optimal acceleration factor is about 7 compared to the standard test. A series of improvement have been introduced to the testing device in order to accommodate with the news tests parameters.

In the second time, we developed a new procedure for testing stress cracking resistance of seams. The test developed involves a constant tensile load of 5 MPa, a notch depth of 30% of the thickness and under 70°C in an incubation medium of 5% IGEPAL CA-720 and 95% tap water.

Finally, this new test adopted to geomembranes seams was carried out on the seams performed by Sarazin (1998). Results analysis shows that is possible to identify various behavior in term of seams long term resistance to stress cracking. Specifically, the results show the inconsistency of peel test to predict long term performance of welding: overheated and over pressed seams considered to be adequate by peel test, but show poor Stress Cracking Resistance.

Additional works are suggested to confirm the efficiency of new developed test to be applied on other welds, and eventually to suggest it as a control quality test.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>DÉDICACE .....</b>	<b>iv</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>v</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>xviii</b>
<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>xxi</b>
<b>LEXIQUE .....</b>	<b>xxii</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : LES GÉOMEMBRANES.....</b>	<b>5</b>
<b>I.1 Généralités sur les géosynthétiques.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Les géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD).....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.1 Introduction sur les polymères .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.2 Le Polyéthylène .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.3 Les molécules de liaison .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.4 Température de transition vitreuse dans la région amorphe .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3 Le soudage des géomembranes PEHD .....</b>	<b>13</b>

## **CHAPITRE II : LA RÉSISTANCE À LA FISSURATION**

<b>SOUS CONTRAINTE .....</b>	<b>16</b>
II.1 Introduction.....	16
II.2 Mécanismes de rupture.....	16
II.2.1 Rupture ductile et rupture fragile .....	17
II.2.2 Mécanisme de fissuration sous contrainte .....	18
II.2.3 Propagation lente des fissures (SCG) .....	20
II.3 Les facteurs affectant la résistance à la fissuration sous contrainte .....	22
II.4 Mécanisme de fissuration des géomembranes PEHD.....	23
II.4.1 Phénomène .....	23
II.4.2 Les facteurs affectant le phénomène de Stress Cracking.....	25
II.5 Prédiction et évaluation de la résistance à la fissuration sous contrainte.....	26
II.5.1 Introduction.....	26
II.5.2 Le rôle du surfactant .....	29
II.5.3 Le test ASTM D1693 « Bent Strip Test » .....	31
II.5.4 Le test ASTM D5397 « Notched Constant Tensile Load » .....	32
II.5.4.1 Effet de la température sur le comportement de la contrainte à la limite élastique.....	33
II.5.4.2 Les résultats du test « NCTL » .....	34
II.5.4.3 Interprétations des résultats .....	34
II.5.5 Le test SP-NCTL .....	36
II.5.5.1 Conditions de l'essai .....	36
II.5.5.2 Les facteurs influençant les résultats de l'essai SP-NCTL.....	37
II.5.5.3 Limitations.....	38
II.5.6 Le test BAM.....	39

## **CHAPITRE III : CARACTÉRISATION DES SOUDURES DOUBLES**

### **PAR FUSION..... 40**

III.1 Étude du comportement des soudures.....	40
III.2 Les essais destructifs de pelage et de cisaillement .....	41
III.2.1 Description des essais.....	41
III.2.2 Critiques des essais destructifs.....	42
III.3 Essais thermiques.....	43
III.4 Évaluation de la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures.....	45
III.4.1 Description du phénomène .....	45
III.4.2 Les différents tests d'évaluation de la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures .....	47
III.4.2.1 Le test SCTL : « Seam Constant Tensile Load » .....	47
III.4.2.2 Le test BAM .....	50
III.5 Conclusion.....	51

## **CHAPITRE IV : CONCEPTION DU BANC D'ESSAI DE FISSURATION**

### **SOUS CONTRAINTE..... 53**

IV.1 Idées générales.....	53
IV.2 Le bain d'incubation .....	54
IV.2.1 Le circulateur d'immersion .....	55
IV.2.2 Régulateur de niveau.....	55
IV.3 Le support des échantillons.....	55
IV.4 La charge appliquée .....	57
IV.5 La machine à entaille « Notching Device » .....	58
IV.5.1 Les problèmes rencontrés.....	60
IV.5.2 Les améliorations suggérées.....	62
IV.6 Modifications faites sur le banc d'essai .....	65

IV.6.1 Les dimensions des supports .....	65
IV.6.2 Les comptes temps .....	66
IV.6.3 Le système de régulation du niveau d'eau .....	67
IV.7 Différence des résultats entre les deux bancs d'essai .....	67
IV.8 Calcul du pourcentage d'erreur sur la charge appliquée.....	68
IV.9 Les recommandations concernant le banc d'essai .....	69
IV.9.1 Contrôle et limite de l'évaporation .....	69
 <b>CHAPITRE V : ESSAI DE FISSURATION SOUS CONTRAINTE .....</b>	<b>71</b>
 V.1 Méthodologie des essais de fissuration sous contrainte.....	71
V.1.1 Matériaux utilisés .....	71
V.1.2 Éprouvettes : forme et dimensions .....	72
V.1.3 Le surfactant.....	74
V.1.4 Effet de la température sur le comportement de la contrainte à la limite élastique .....	76
V.1.4.1 Section expérimentale .....	76
V.1.4.2 Résultats des essais .....	78
V.1.5 Les paramètres de l'essai .....	79
V.1.5.1 La température.....	79
V.1.5.2 La contrainte appliquée à 50°C.....	80
V.1.5.3 La contrainte appliquée à 70°C.....	81
V.2 Essais sans entaille sur feuille et soudure de géomembrane PEHD .....	86
V.2.1 Mode opératoire .....	86
V.2.2 Résultats des essais.....	86
V.3 Essais avec entaille sur des feuilles de géomembranes vierges à 50 et 70°C.....	87
V.3.1 Résultats des essais.....	89
V.3.2 Analyse des résultats .....	92

V.3.3 Observation SEM :microscope électronique à balayage .....	94
V.3.4 Effet d'une substitution de la solution active à 50°C .....	95
V.3.5 Effet d'une double entaille de 20% sur l'épaisseur totale .....	95
V.4 Essais préliminaires sur les soudures double par fusion pour évaluer les conditions d'essai .....	97
V.4.1 Influence de la localisation de l'entaille .....	97
V.4.2 Influence de la profondeur d'entaille .....	99
V.4.2.1 Résultats .....	99
V.4.2.2 Morphologie de rupture au niveau d'une soudure double par fusion .....	102
V.4.2.3 Vitesse de croissance de la fissuration.....	103
V.4.3 Comparaison des résultats des essais sur les soudures et sur les feuilles vierges .....	105
V.4.4 Sélection des conditions expérimentales .....	106
V.5 Essais sur les soudures de Sarazin (1998) .....	107
V.5.1 Rappel des travaux précédents.....	107
V.5.1.1 Programme expérimental .....	107
V.5.1.2 Résultats .....	108
V.5.1.3 Conclusions .....	111
V.5.2 Essai de fissuration sur les soudures .....	111
V.5.2.1 Sélection des soudures .....	112
V.5.2.2 Les conditions de l'essai développé.....	112
V.5.3 Résultats des essais sur les soudures .....	114
V.5.3.1 Analyse.....	115
V.5.3.2 Conclusion.....	119

<b>CHAPITRE VI : DISCUSSION.....</b>	<b>121</b>
VI.1 Le banc d'essai .....	121
VI.2 Les paramètres de l'essai .....	121
VI.3 Les essais de résistance à la fissuration sous contrainte sans entaille .....	123
VI.4 Les essais de résistance à la fissuration sous contrainte avec entaille sur les feuilles.....	123
VI.5 Les essais de résistance à la fissuration sous contrainte avec entaille sur les soudures .....	124
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>125</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>128</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>140</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1	Comparaison entre RCP et SCG1 .....	9
Tableau II.2	Conditions expérimentales des différents test ASTM pour l'évaluation de la SCR .....	27
Tableau II.3	Avantages et inconvénients des essais ASTM .....	28
Tableau III.1	Les moyennes des temps de rupture sur 43 échantillons de soudure (d'après Thomas, 1998) .....	51
Tableau IV.1	Temps de rupture enregistrés sur les deux bancs d'essai .....	68
Tableau V.1	Caractéristiques mécaniques et physiques de la géomembrane GSE .....	72
Tableau V.2	Dimensions des découpes (d'après ASTM D638 et D1822) .....	74
Tableau V.3	Comparaison entre les deux types de surfactant utilisés .....	75
Tableau V.4	Effet de la température sur la contrainte à la limite élastique .....	78
Tableau V.5	Pourcentage d'allongement après 500 heures .....	87
Tableau V.6a	Les résultats des essais sur feuilles vierges à 50 et 70°C .....	90
Tableau V.6b	Variation du temps de rupture en fonction de la température pour les trois différentes formes d'éprouvettes et profondeurs d'entailles .....	91
Tableau V.6c	Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille pour les trois différentes formes d'éprouvettes à 70°C .....	92
Tableau V.7	Résultats des essais préliminaires sur une soudure double par fusion .....	98
Tableau V.8	Moyennes des temps de rupture obtenues à différentes profondeurs d'entaille .....	99
Tableau V.9	Conditions de soudage convenables (Sarazin, 1998) .....	110
Tableau V.10	Temps de rupture enregistrés sur les soudures jugées de bonne qualité par Sarazin (1998) .....	114

<b>Tableau V.11 Résultats des essais sur les soudures considérées de qualité plus médiocre par Sarazin (1998).....</b>	<b>115</b>
<b>Tableau V.12 Choix des meilleures conditions de soudage .....</b>	<b>119</b>



## LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Les six types de produits géosynthétiques .....	6
Figure I.2	Structure cristalline du polyéthylène avec des chaînes macromoléculaires, les cristallites et la formation de sphérolites (Riemslog, 1997).....	10
Figure I.3	Section en coupe d'une double soudure par fusion (Sarazin, 1998, d'après Thomas et Allen, 1997) .....	14
Figure II.1	Diagramme schématique illustrant la déformation fragile (Lustiger et Rosenberg, 1988) .....	17
Figure II.2	Désenchevêtrement des molécules de liaison et processus de fissuration sous contrainte (Berthold et al. 1996) .....	21
Figure II.3	Le Bent Strip Test (ASTM D1693-97a) .....	31
Figure II.4	Courbe de réponse typique du test NCTL (ASTM D5397-95).....	34
Figure II.5	Illustration de l'essai SP-NCTL (ASTM D5397-95).....	37
Figure III.1	Placement d'entaille sur les spécimens, Seam Constant Tensile Load (GRI Test Method GM5, 1998).....	48
Figure III.2	Section en coupe d'une double soudure par fusion montrant la localisation de l'Entaille (Carlson et al. 1993) .....	49
Figure IV.1	Banc d'essai développé pour la mesure du stress cracking.....	54
Figure IV.2	Composantes du support des échantillons.....	56
Figure IV.3	Bras de levier et calcul de la charge appliquée.....	58
Figure IV.4	Machine à entaille utilisée « Notching Device » .....	59
Figure IV.5	Les défauts observés sur la machine à entaille.....	61
Figure IV.6	Nouvelle machine à entaille .....	63
Figure IV.7	Modifications suggérées sur la nouvelle machine à entaille .....	64
Figure IV.8	Comparaison entre les deux supports des échantillons.....	66

Figure V.1	Découpe ASTM D1822 (d'après ASTM D1822).....	73
Figure V.2	Découpe ASTM D638 type I et IV (d'après ASTM D638).....	73
Figure V.3	Essai de traction standardisé dans une chambre environnementale ..	77
Figure V.4	Courbe de tendance de la contrainte à la limite élastique en fonction de la température .....	79
Figure V.5	Courbe ductile fragile de la géomembrane utilisée pour réaliser les soudures à 70°C.....	82
Figure V.6a	Faciès de rupture semblable au niveau de la section transversale d'une éprouvette ASTM D638 type IV (a) et d'une éprouvette ASTM D1822 (b) à 50°C .....	83
Figure V.6b	Morphologie de rupture au niveau de la section transversale d'une éprouvette ASTM D638 type IV à 50°C (a) sous charge constante de 30% de la contrainte à la limite élastique et à 70°C (b) sous une contrainte constante de 5 MPa .....	84
Figure V.7	Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille pour une géomembrane PEHD dégradée.....	89
Figure V.8	Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille à 50°C et à 70°C pour l'éprouvette ASTM D1822.....	92
Figure V.9	Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille à 70°C pour les trois formes d'éprouvettes.....	93
Figure V.10	Microstructure de rupture d'une géomembrane PEHD soumise à l'essai standard ASTM D5397 (E : entaille) .....	94
Figure V.11	Les différentes positions d'entaille .....	97
Figure V.12	Ligne de fusion observée au niveau de la soudure DCC .....	100
Figure V.13	Temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille pour les soudures DDC et BBC .....	101
Figure V.14	Morphologie de la surface de rupture au niveau d'une soudure double par fusion .....	102

Figure V.15	Croissance de la fissuration en fonction du temps au niveau de la soudure CBC .....	103
Figure V.16	Morphologie de la zone endommagée à la base de l'entaille après 30 heures d'essai à 70°C et sous une contrainte constante de 5 MPa.....	104
Figure V.17	Faciès de rupture au niveau d'une géomembrane et une soudure soumis à une contrainte constante de 5 MPa, à 70° pour des profondeurs d'entaille respectives de 20 et 60% de l'épaisseur totale .....	105
Figure V.18	Dimensions de la soudure double .....	107
Figure V.19a	Les temps de rupture pour la vitesse de soudage de 4.5ft/min.....	117
Figure V.19b	Les temps de rupture pour la vitesse de soudage de 9ft/min.....	118
Figure V.19c	Les temps de rupture pour la vitesse de soudage de 13.5ft/min.....	118

## **LISTE DES ANNEXES**

**ANNEXE I** Table de calcul : charges appliquées, profondeurs d'entailles et temps de ruptures

**ANNEXE II** Micrographies : Observations au microscope électronique par balayage

## LEXIQUE

**Fibrille (Fibrill) :** Produit obtenu par fibrillation. "Fibrillation" : Opération consistant à cliver longitudinalement un film de polymère, après étirage et gravure.

**Molécules de liaison (Tie molecules) :** Les polyoléfines sont constitués d'une phase cristalline dans laquelle les chaînes moléculaires s'organisent en cristallites pour former des lamelles et une région amorphe entre ces lamelles, formée de molécules de liaison. Elles sont les seules chaînes polymériques qui peuvent transférer les charges d'une région cristalline à une autre

**Monomère (Monomer) :** Molécule de formule simple et de poids moléculaire relativement bas, qui, par enchaînements successifs avec des molécules identiques ou différentes, donne naissance à une structure polymérique.

**Polymère (polymer) :** Composé obtenu par l'enchaînement d'un grand nombre de molécules simples appelées monomères.

**Polymérisation :** Processus chimique par lequel les petites molécules (monomères) s'enchaînent pour former une molécule de polymère.

**Rupture ductile (Ductile fracture) :** Rupture associée à une forte déformation plastique, c'est-à-dire avec une absorption importante d'énergie mécanique. L'aspect de la fracture est terne et fibreux.

**Rupture fragile (Brittle fracture) :** La contrainte appliquée est plus faible que celle nécessaire pour la déformation ductile. Elle a lieu généralement dans la région amorphe entre les sphérolites, produisant une large fracture

**Sphérolites (Spherulites) :** Ensembles sphériques de cristaux, formés suite au désenchevêtrement de segments de chaînes du polymère fondu.

**Taux de cristallinité (X) :** Fraction de la masse du polymère se trouvant à l'état cristallin.

**Température de transition vitreuse ( $T_g$ ) :** Température caractéristique du passage d'un polymère semi-cristallin, d'un état vitreux à un état visqueux ou caoutchouteux lors d'une élévation de température.

**Température de fusion ( $T_f$ ) :** Température à laquelle, sous une certaine pression, le solide et le liquide sont en équilibre.

**Thermoplastique :** Polymère se ramollissant par chauffage et retrouvant sa dureté d'origine après refroidissement.

## INTRODUCTION

Depuis une quarantaine d'années, les géosynthétiques se sont infiltrés dans le domaine de la géotechnique, leur fonction étant à l'origine d'améliorer le comportement physique, mécanique et hydraulique des sols auxquels ils étaient adjoints. En quelques années à peine, l'utilisation de matériaux géosynthétiques, particulièrement celle des géomembranes dans les ouvrages de confinement, surtout dans le domaine environnemental, a connu un essor considérable.

Les procédés d'étanchéité par géomembranes représentent aujourd'hui une alternative moderne et fiable aux matériaux naturels pour assurer l'imperméabilisation des cellules de confinement des déchets, des bassins de retenue des effluents industriels, des réservoirs de retenue d'eau et des canaux. Ces membranes doivent maintenir leur performance tout au long de la durée de vie de l'ouvrage, en particulier leur faible perméabilité afin de protéger l'environnement. La géomembrane polyéthylène haute densité est généralement sélectionnée car elle est reconnue comme étant l'une des plus résistantes aux attaques chimiques, la plus disponible et celle qui s'ajuste au plus grand nombre d'applications.

Les exigences en matière d'étanchéité fixées pour les géomembranes prévalent également pour les joints. La propriété principale d'une soudure est d'assurer une continuité entre deux feuilles d'une géomembrane pour empêcher toute fuite de liquide dans le sol. De plus, cette soudure doit être capable de transférer les forces de tension de feuille en feuille.

L'assemblage des feuilles est effectué sur le site à l'aide d'appareils portatifs en fournissant une quantité d'énergie nécessaire pour fondre le polymère à la surface des feuilles. La technique de soudage par élément chauffant, donnant une soudure double séparée par un canal, est la plus utilisée. La qualité de l'assemblage est tout particulièrement dépendante des conditions environnementales, de l'expérience du soudeur, de la géométrie des feuilles, de la propreté des surfaces des feuilles et des paramètres de soudage.

Cependant, certains agents tensio-actifs peuvent induire dans la géomembrane PEHD ce qu'on appelle la fissuration sous contrainte environnementale "*Environmental Stress Cracking*". Il s'agit d'une rupture fragile qui survient à une contrainte nettement inférieure à la contrainte d'écoulement. Ce phénomène est le résultat de l'action conjointe et interactive d'un environnement plus ou moins agressif et d'une mise sous charge, une situation courante dans les décharges. Il survient très souvent à proximité des soudures des géomembranes. Il est vraisemblable que cette zone ait pu subir, lors de l'opération de soudage, de forts gradients thermiques et de pression qui tendent à accentuer les contraintes résiduelles, et à entraîner la formation de craquelures aux endroits de concentration de contraintes. D'autre part, dans cette région, on peut voir apparaître des griffures réalisées par les molettes de l'appareil de soudage lors du serrage des deux lés, qui agissent comme des défauts de surface susceptibles d'initier la fissuration.

Depuis quelques années, de nombreux articles font état des lacunes en matière d'évaluation du comportement à long terme des soudures. Des essais plus poussés ont été suggérés pour tester les soudures et vérifier l'influence des conditions de soudage sur les essais de stress cracking afin de pouvoir les distinguer et évaluer leurs performances à long terme.



Dans cette optique, le présent travail de recherche se propose d'évaluer la résistance à la fissuration sous contrainte au niveau de soudures doubles par fusion. Celles-ci ont été réalisées dans le cadre de l'étude réalisée par Sarazin (1998), où il s'est particulièrement intéressé à l'étude du comportement des joints de géomembranes PEHD en fonction des paramètres de soudage.

## **OBJECTIFS**

Notre étude a pour principal objectif l'évaluation de la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures en fonction des paramètres de soudage. Cependant, les objectifs se réduisent plus spécifiquement à :

- 1- Accélérer l'essai standard de fissuration sous contrainte (ASTM D5397) : faire varier les dimensions des éprouvettes, la localisation et la profondeur d'entaille, la température et la composition de la solution active, ainsi que la contrainte appliquée;
- 2- Développer un essai de fissuration sous contrainte approprié aux soudures doubles par fusion. Cette phase s'articule en deux étapes : la première consistant à concevoir un banc d'essai adapté aux soudures, la deuxième visant à identifier les paramètres influençant l'essai en pratique;
- 3- Vérifier la cohérence des conditions du nouvel essai;
- 4- Évaluer la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures réalisées par Sarazin (1998). Parmi celles-ci, 33 soudures ont été sélectionnées pour nos essais dans le but d'identifier les conditions de soudage offrant les meilleurs temps de rupture, et par conséquent, une meilleure performance à long terme.

La première partie de ce travail constitue une revue de littérature scindée en trois chapitres. Dans le premier, nous présentons succinctement les géomembranes PEHD. Ensuite, le mécanisme de fissuration sous contrainte des géomembranes PEHD et les différents essais de caractérisation de fissuration sont présentés. Enfin, sont répertoriés les différentes méthodes pour essayer d'évaluer la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures.

La deuxième partie est consacrée à la conception du banc d'essai et à la méthodologie appliquée. Celle-ci détaille les améliorations effectuées ou à envisager par rapport aux dispositifs commerciaux existant.

Enfin, une troisième partie est dédiée aux essais de fissuration sous contrainte réalisés sur les soudures, ainsi qu'à l'analyse des résultats.

## **CHAPITRE I**

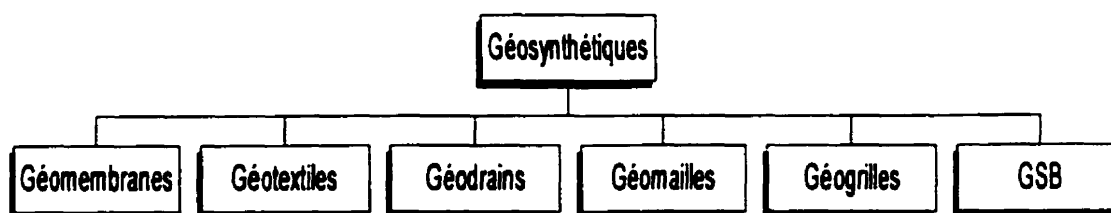
### **LES GÉOMEMBRANES PEHD**

#### **I.1 Généralités sur les géosynthétiques**

Supporté par les organismes réglementaires, les géosynthétiques ont envahi depuis une vingtaine d'années, le domaine de l'environnement en permettant de réduire les coûts des interventions autrefois réalisées à l'aide des seuls matériaux naturels. Tant par leur qualité, que par leur fiabilité, ces matériaux se sont imposés comme des outils indispensables à la gestion de l'environnement. De nos jours, les matériaux géosynthétiques couvrent toute une gamme d'usages différents. Ils ont des origines et des caractéristiques différentes pour s'adapter aux besoins spécifiques des clientèles qu'ils desservent.

Les géosynthétiques sont des produits plans, fabriqués à partir de polymères et qui sont utilisés en combinaison avec des matériaux géotechniques naturels dans divers ouvrages. Ils sont choisis pour remplir une fonction particulière et exclusivement celle-ci. De même, ils peuvent être composés de façon à remplir un certain nombre de fonctions dont : la séparation, la filtration, le drainage, l'étanchéité, la protection. (Marcotte, 2000).

La famille des géosynthétiques comprend de plus en plus de nouveaux produits. Les raisons de cet engagement pour les géosynthétiques sont nombreuses : facilité d'installation, prix compétitifs et grande flexibilité. On distingue plus de six types de produits appartenant à cette famille et ayant des fonctions bien distinctes (Figure I.1) :



**Figure I.1 : Les six types de produits géosynthétiques**

Mais comme tout matériau, leur utilisation impose des limites et des précautions qu'il est essentiel de maîtriser. Les matériaux géosynthétiques présentent des inconvénients liés surtout au manque de connaissances de certains utilisateurs; de plus, la performance à long terme des matériaux géosynthétiques est peu connue en raison de leur utilisation relativement récente.

Parmi ces matériaux, les géomembranes présentent une alternative aux matériaux naturels pour assurer l'imperméabilisation des parois des bassins et cellules utilisées pour contenir les liquides et des déchets. Elles sont utilisées comme barrière hydraulique dans les ouvrages de confinement, remplaçant l'argile ou autres matériaux naturels similaires, et offrent un large éventail d'avantages utiles lors de la conception ou la construction de projets de génie civil à caractère environnemental.

Les géomembranes sont constituées en grande partie de polymère synthétique possédant une faible conductivité hydraulique. À cet effet, il existe plusieurs types de géomembranes dont la sélection dépend des paramètres de conception et des contraintes spécifiques du projet.

Les polymères utilisés dans la fabrication de ces nappes imperméables sont en ordre d'utilisation, le polyéthylène haute densité (PEHD), le chlorure de polyvinyle (PVC), le polyéthylène très basse densité (VDLPE), les sulfuro-chlorés (CSPE), les polyéthylènes chlorés (CPE), le polypropylène (PP) et le composite polypropylène élastomère (PP-EPDM).

La perméabilité des géomembranes se situe entre  $10^{-10}$  et  $10^{-13}$  cm/sec, ce qui est de loin inférieure à la meilleure des argiles naturelles ( $10^{-7}$  cm/sec). Les géomembranes sont flexibles et peuvent s'adapter à des mouvements différentiels, le PEHD demeure élastique jusqu'à 15% d'élongation et son point de rupture se situe à 600%. A titre de comparaison pour l'argile, l'élongation admissible se limite à entre 1.5 et 4% (Lessard, 2000, Marcotte, 2000).

## **I.2 Les géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD)**

Les géomembranes PEHD sont obtenues à partir de polyéthylène de moyenne densité contenant du noir du carbone et des adjuvants. Il s'agit d'un polyoléfine viscoélastique issu de la polymérisation du monomère éthylène, il est l'un des polymères les plus inertes du fait de sa simple structure chimique et sa semi-cristallinité. Il se caractérise par une densité élevée et une linéarité de ses chaînes polymériques, procurant au polymère une résistance chimique à une grande variété de corrosifs et une excellente résistance aux rayons ultraviolets et aux basses températures, ainsi que des propriétés mécaniques excellentes.

La géomembrane PEHD est généralement sélectionnée car elle est reconnue comme étant la plus résistante aux attaques chimiques, offre une très faible conductivité hydraulique, la plus disponible et celle qui s'ajuste au plus grand nombre d'applications (Landreth, 1990; Tisinger et al., 1990; Koerner et al., 1990; Tisinger et Giroud, 1993; Rollin, 1998).

### **1.2.1 Introduction sur les polymères**

Un polymère est un composé obtenu par l'enchaînement d'un grand nombre de molécules simples appelées monomères. Le processus chimique par lequel ces molécules s'enchaînent pour former une molécule de polymère est appelé la polymérisation. La polymérisation par addition entraîne la formation de macromolécules linéaires, qui peuvent se ramifier, alors que la polycondensation engendre en général un réseau tridimensionnel (Fisa, 1994).

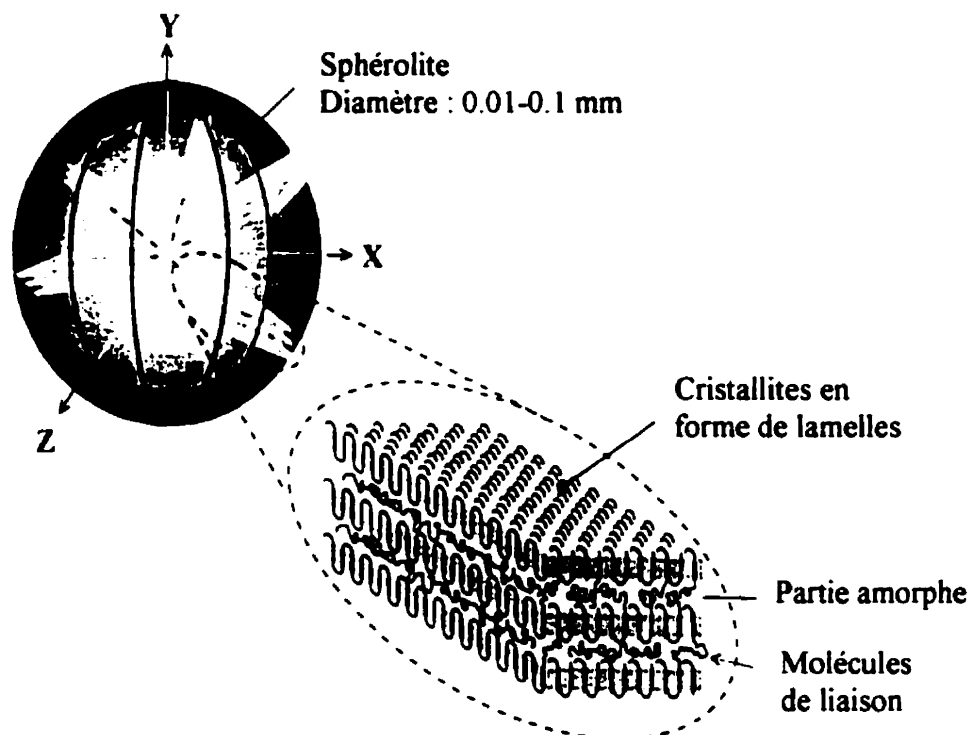
Un polymère semi-cristallin peut être caractérisé par ses propriétés thermiques : sa température de transition vitreuse  $T_g$  (qui représente la température à partir de laquelle certains mouvements de chaînes sont possibles), sa température de fusion  $T_f$  et son taux de cristallinité.

On appelle polyoléfines, les polymères dérivés de la polymérisation de l'éthylène dans lesquels on peut substituer des hydrogènes par un groupement hydrocarboné différent. Les plastiques solidifiés par refroidissement sont appelés thermoplastiques. Dans ce cas, la structure chimique du polymère ne change pas pendant la fabrication et le cycle formage-consolidation peut être, en principe, répété indéfiniment. Les macromolécules ne sont liées entre elles que par des liaisons de faible intensité.

### **I.2.2 Le Polyéthylène**

Le polyéthylène est un polymère semi-cristallin. Les molécules se cristallisent suite au repli des chaînes polymériques, formant des lamelles. Celles-ci sont généralement arrangées en structure sphérolitiques sous forme de larges agrégats appelés sphérolites (Cadwallader et al. 1994).

Une configuration de l'alternance de régions cristallines et amorphes est représentée schématiquement sur la Figure I.2. Dans les zones cristallines, les chaînes macromoléculaires sont repliées sur elles-mêmes et forment des cristaux dont l'arrangement est particulier à chaque polymère. Ces chaînes doivent former les boucles pour pouvoir entrer dans le cristal, et inévitablement des parties de chaînes en sont exclues. De plus, une chaîne peut participer à plus d'un cristal, ce qui au fur et à mesure que le taux de cristallinité augmente, limite la liberté et la mobilité des segments de chaînes qui ne sont pas encore cristallisés. Par conséquent, d'après Riemsdag (1997), les polymères à chaînes très longues dans lesquelles la probabilité de participer à plus d'un cristallite est élevée, donneront des taux de cristallinité plus faibles que leurs homologues à chaînes plus courtes.



**Figure I.2 : Structure cristalline du polyéthylène avec des chaînes macromoléculaires, les cristallites et la formation de sphérolite.**  
(Riemslog, 1997)

La présence de cristallites et de sphérolites est l'un des aspects de la structure du polyéthylène qui déterminent ses propriétés physiques. Un autre aspect aussi important concerne le type d'arrangement moléculaire dans la région amorphe du polymère. Ce matériau amorphe est incorporé entre et à l'intérieur des sphérolites. Les grandes sphérolites contribuent à la fragilité du polymère. Le développement des fissures tend à éviter autant que possible les sphérolites et trace une voie d'accès autour des bornes sphérolitiques (Cadwallader et al. 1994).



### **I.2.3 Les molécules de liaison**

Les polyoléfines sont constitués d'une phase cristalline dans laquelle les chaînes moléculaires s'organisent en cristallites pour former des lamelles et une région amorphe entre ces lamelles, formée de molécules de liaison (*tie molecules*). Pour qu'elles soient cohésives, ces molécules doivent être assez longues afin de faire le pontage entre les lamelles serpentées. La distance entre les lamelles est assimilée comme le double de l'épaisseur de la lamelle, plus celle de la partie amorphe (Zhou et al. 1994).

Les molécules de liaison sont les seules chaînes polymériques qui peuvent transférer les charges d'une région cristalline à une autre. Selon Cadwallader et al. (1994), le nombre de ces molécules augmente avec la masse moléculaire, la longueur des chaînes et diminue pour une augmentation de cristallinité.

- **Le poids moléculaire**

Des masses molaires moyennes élevées (traduites par de faibles indices de fluidité du polymère) correspondent à des chaînes de polymère plus longues, ce qui augmente le nombre de molécules de liaison. La distribution de poids moléculaire peut être variable suivant le type de résines. Les résines avec de larges distributions de poids moléculaire ont beaucoup de chaînes à faible poids moléculaire qui tendent à être exclues de la structure sphérolitique, et occupent donc les zones amorphes.

Les résines avec des distributions de poids moléculaire étroites ont moins de chaînes à faible poids moléculaire à proximité des sphérolites et donc elles sont moins sensibles à la fissuration inter sphérolitique (Cadwallader et al., 1994).

- **Les co-monomères**

Ce sont de longues chaînes de polyoléfines qui sont incorporées dans le polyéthylène qui diminuent la cristallinité en fournissant de courts branchements dans la chaîne du polyéthylène. Ces courtes chaînes fournissent une plus grande efficacité des enchevêtrements des molécules de liaison empêchant ainsi leur capacité à se détendre et à glisser les unes sous les autres. Les co-monomères augmentent essentiellement la quantité et l'efficacité des molécules de liaison sans produire une chute significative de la densité.

- **La densité**

C'est une mesure indirecte de la cristallinité. Plus le matériau est cristallin, plus le nombre de molécules de liaison inter cristallin sera faible. La densité des molécules de liaison augmente pour une augmentation du poids moléculaire, et elle est influencée par le degré de cristallinité et la taille des cristaux.

#### **1.2.4 Température de transition vitreuse dans la région amorphe**

Rappelons que les polymères semi-cristallin sont des matériaux à deux phases : une dispersion de cristaux dans une phase amorphe. De tels matériaux sont caractérisés par deux températures de transition principales : la température de transition vitreuse,  $T_g$ , et la température de fusion  $T_f$ .

La température de transition vitreuse d'un polyéthylène, qui correspond au passage de l'état vitreux à l'état caoutchouteux pour la phase amorphe, se situe approximativement à  $-120^{\circ}\text{C}$ . Quant à la partie cristalline, la température du pic de fusion est d'environ  $95$  à  $140^{\circ}\text{C}$ . La région cristalline est plus ferme et rigide que la région amorphe et agit comme une charge (*filler*) qui contraint la déformation dans la région amorphe adjacente et par conséquent rehausse la  $T_g$ . De plus, la contrainte n'est pas souvent distribuée à travers la région amorphe. Elle reste en effet plus prononcée à l'interface cristalline-amorphe (Riemslog, 1997).

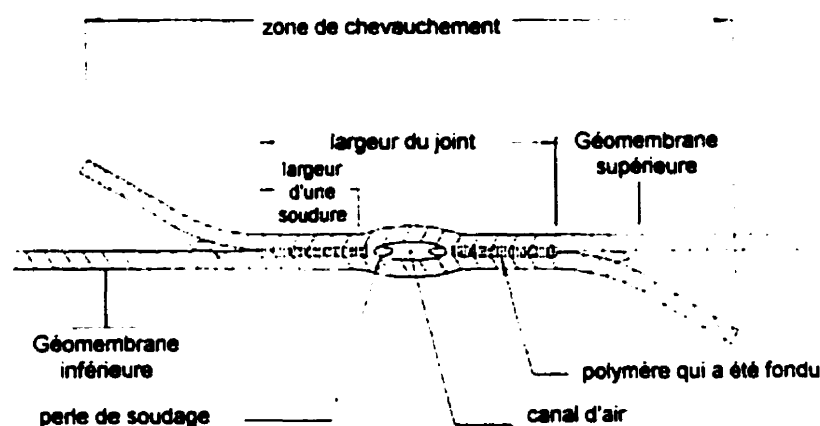
La température de transition vitreuse ( $T_g$ ) pour un polymère comme le PEHD est une température critique. Trotignon et al. (1991) ont montré que cette température correspond aux mouvements de segments de macromolécules de 50 à 100 atomes de carbone. Au-dessus de cette température, les mouvements de chaînes permettront des déformations plus importantes et plus faciles.

### **I.3 Le soudage des géomembranes PEHD**

Les exigences en matière d'étanchéité fixées pour les géomembranes prévalent également pour les joints. La propriété principale d'une soudure est d'assurer une continuité entre deux feuilles d'une géomembrane pour empêcher toute fuite de liquide dans le sol. En plus, cette soudure doit être capable de transférer les forces de tension de feuille en feuille.

L'assemblage de feuilles PEHD est effectué sur le site à l'aide d'appareils portatifs. Parce qu'il est très inerte chimiquement, le PEHD ne peut être assemblé efficacement que par fusion. Les soudures sont obtenues en fournissant une quantité d'énergie nécessaire pour fondre le polymère à la surface des feuilles, cette quantité d'énergie est transmise soit par des éléments électriquement chauffés, soit par de l'air chaud ou soit par un extrudat chaud.

Il existe plusieurs techniques pour le soudage des géomembranes PEHD, par lesquelles sont obtenues des soudures de géométrie très variable, permettant souvent d'identifier le type de technique utilisé. La technique de soudage par élément chauffant, donnant une soudure double séparée par un canal, est la plus utilisée (Figure I.3).



**Figure I.3 : Section en coupe d'une double soudure par fusion**  
(Sarazin, 1998, d'après Thomas et Allen, 1997)

Le processus de soudage par élément chauffant consiste à faire passer entre les feuilles une pièce de métal chauffée électriquement à une température généralement de l'ordre de 375 à 400°C (Maranda, 1995). La vitesse à laquelle passe l'élément chauffant est la vitesse de soudage, dont l'ordre de grandeur est de 1 à 2 m/min (Sarazin, 1998). Après le passage de l'élément chauffant, qui touche la surface des géomembranes, les feuilles sont mises en contact et soumises à une pression de soudage qui favorise l'interpénétration du polymère fondu. La largeur soudée d'un joint obtenu par fusion doit être plus grande que 30 mm avec un débordement de 50 mm de la feuille inférieure et de 5 fois l'épaisseur de la feuille supérieure (Rollin, 1998).

La qualité des soudures dépend de plusieurs facteurs reliés à l'appareillage, à l'expertise des opérateurs, aux conditions atmosphériques ( température et humidité), à la géométrie des feuilles (épaisseur, ondulation, surface...), à la propreté des surfaces des feuilles et surtout aux paramètres de soudage qui sont la température, la vitesse de soudage et la force appliquée par les rouleaux.

## CHAPITRE II

### LA RÉSISTANCE À LA FISSURATION SOUS CONTRAINTE

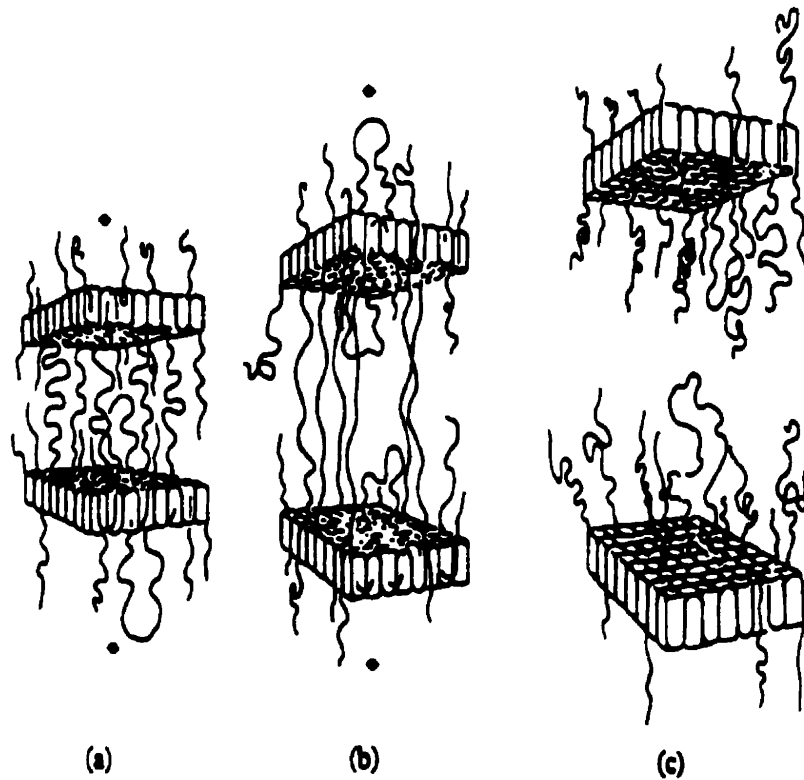
#### II. 1 Introduction

La fissuration sous contrainte ou encore *Stress Cracking* est définie d'après ASTM D883-88 comme étant « *une fissuration interne ou externe dans le plastique causée par des sollicitations à long terme, à des niveaux de contraintes nettement inférieurs à la contrainte du seuil d'écoulement, et appliquées à très faibles vitesses de déformation* ».

La cristallinité élevée des polyoléfines tel que le PEHD entraîne une diminution du nombre de molécules de liaison et donc une diminution de la résistance à la déformation fragile et de la résistance à la fissuration sous contraintes. Lustiger (1983), suggère que la cristallinité et l'indice de fluidité peuvent être relié à la résistance au stress cracking du matériau par le nombre de molécules de liaison. Les polymères ayant un grand poids moléculaire et une faible cristallinité contiennent généralement un plus grand nombre de molécules de liaison, par conséquent ils seront plus résistants au stress cracking.

#### II.2 mécanismes de rupture

Le polyéthylène présente deux types de rupture : une rupture ductile par déformation homogène, et une rupture fragile initiée au point de concentration de contrainte. Une modélisation du comportement du polymère sous contrainte du point de vue moléculaire a été proposée par Lustiger et Rosenberg (1988). Le modèle est présenté sur la Figure II.1.



**Figure II.2 : Diagramme schématique illustrant la déformation fragile  
(Lustiger et Rosenberg, 1988)**

### **II.2.1 Rupture ductile et rupture fragile**

Une fracture ductile est provoquée par des tensions de chaînes sous des contraintes élevées. En effet, les lamelles commencent à se séparer et les molécules de liaison s'étirent à leur maximum. La force de cohésion entre les lamelles est plus faible que celle des molécules de liaison qui résulte en un détachement des lamelles en des petits groupes de segments de chaînes : ce phénomène est appelé fibrillation. La région de la rupture ductile est caractérisée par un cisaillement microscopique des ligaments.

Dans le cas d'une rupture fragile, la contrainte appliquée est plus basse que celle nécessaire pour la déformation ductile. Dans ce cas, les molécules de liaison sont sous tension, mais ne sont pas complètement étirées. Après une longue période, ces molécules peuvent casser suite à la relaxation et au désenchevêtrement ou par scission de chaînes. La rupture fragile a lieu généralement dans la région amorphe entre les sphérolites, produisant une large fracture. Elle débute généralement par une initiation de fissure, qui sera suivie par une croissance lente de fissure.

Les différences des temps de rupture ductile observés par Lu et Brown (1991) parmi les différents type de polyéthylène, sont liées aux différences de limite élastique. Par contre dans le cas de rupture fragile, le temps dépend de l'architecture moléculaire et sa morphologie cristalline et amorphe. Le temps de rupture comporte le temps d'initiation de la croissance de la fissuration en plus du temps de propagation à travers l'épaisseur du spécimen.

### **II.2.2 Mécanisme de fissuration sous contrainte**

Quand on parle du comportement des polymères semi-cristallins vis à vis de la fissuration sous contrainte, on note l'existence de deux mécanismes principaux :

- La propagation rapide des fissures : RCP (*Rapid Crack Propagation*)
- La croissance lente des fissures : SCG (*Slow Crack Growth*)

Le Tableau II.1 ci-dessous présente une comparaison entre ces deux modes de fissuration :



Tableau II.1 : Comparaison entre la RCP et la SCG

<b>Variables</b>	<b>Propagation rapide des fissures RCP</b>	<b>Croissance lente des fissures SCG</b>
<b>Vitesse</b>	Elle se produit à des vitesses extrêmement élevées, généralement supérieures à 300 m/sec. (Plastic Pipe Line, 1982).	Elle se produit à des vitesses inférieures à 0.1 m/sec. (Kinloch et Young, 1983).
<b>Allongement</b>	La fissuration présente un important allongement qui peut atteindre une centaine de mètres de longueur, en se brisant d'une façon dendritique « <i>dendritic pattern</i> ».	L'allongement de la fissuration ainsi que la croissance de la propagation des fissures peut avoir lieu durant la durée de service du matériau causant une rupture prématurée des géomembranes.
<b>Observation</b>	Ce type de fissuration ne se manifeste pas dans les géomembranes en PEHD tant que la température est supérieure à 0°C (Peggs et Carlson, 1990).	Les observations sur site de Hsuan et al, (1993) et Peggs et Carlson, (1990), ont montré que la croissance lente des fissures est le mécanisme majeur responsable de la dégradation des géomembranes en PEHD.
<b>Morphologie</b>	La morphologie de la surface de rupture est sous forme d'écailles (Halse et al.1990).	La morphologie de la surface de rupture est en structure fibreuse. (Halse et al.1990).

### **II.2.3 Propagation lente des fissures (SCG)**

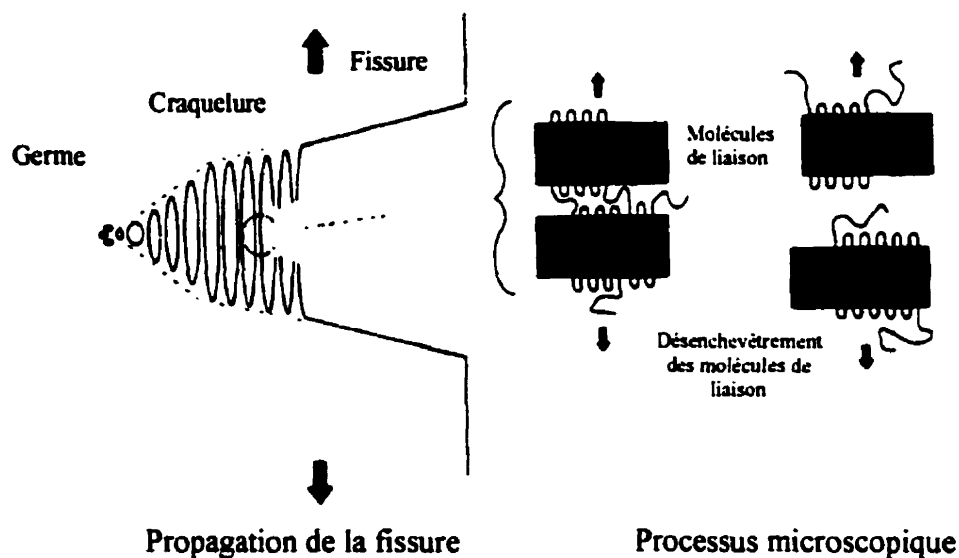
La propagation lente des fissures (SCG) est un mécanisme important de rupture dans le polyéthylène. Il est généralement accepté que ce mécanisme soit la conséquence d'une micro-déformation, suivie d'une fibrillation et d'une cavitation, ainsi qu'une rupture des fibrilles.

Brown et al (1991) cité dans Lagaron et al., (2000) ont suggéré que la propagation lente des fissures est contrôlée par le comportement en fluage du matériau. Rose et al. (1994) soutiennent cette idée en précisant qu'il s'agit d'une fissuration des fibrilles qui se rompent par scission de chaînes et désenchevêtrement des molécules de liaison durant le processus de fissuration au niveau de la craquelure.

Le mécanisme responsable de la rupture est présenté à la Figure II.2 ci-dessous, il implique le désenchevêtrement des molécules des liaisons. La fracture est initiée au niveau des fibrilles de la craquelure qui se forme à la base de l'entaille. Les contraintes appliquées sont aussi faibles pour produire une scission de chaînes. Après l'initiation de la fracture, il y a une accélération générale du taux de croissance de la fissure suite à une élévation de contraintes.

Qian et al. (1993) ont remarqué que tant que les contraintes appliquées sur les bords de la fissure sont faibles, la fracturation des fibrilles a lieu suite au processus de désenchevêtrement plutôt qu'à la scission de chaînes.

D'après Berthold et al. 1996, les premières fissures évitent la région cristalline et se propagent tout le long de la zone amorphe. Dans ces zones amorphes, il existe des chaînes de polymère bien moins arrangées que dans les cristallites.



**Figure II.2 : Désenchevêtrement des molécules de liaison et processus de fissuration sous contrainte (Berthold et al., 1996)**

Des mesures de résistance du SCG parallèlement et perpendiculairement à la direction d'extrusion ont été effectuées par Zhou et al., 1993, sur des résines en polyéthylène. Ils ont mis en évidence que la fissure croît lentement dans la direction perpendiculaire à celle de la direction de l'extrusion (Les fibrilles sont essentiellement orientées dans la direction des contraintes de tension). Lu et al. 1994 ont montré que l'orientation des molécules a un effet significatif sur la fracturation des polymères.

Le temps d'initiation de la fracture par croissance lente des fissures est déterminé par la vitesse d'extension des fibrilles à la base de la craquelure. La morphologie de la fracture est examinée au moyen d'un SEM (*Scanning Electron Microscope*). Dans le cas d'une rupture fragile, la morphologie est dominée par une structure fibreuse avec des petites sections de structure hérissée (Halse et al. 1990a).

### **II.3 Les facteurs affectant la résistance à fissuration sous contrainte**

La résistance à la fissuration sous contrainte dépend du poids moléculaire et des caractéristiques structurales tel que le nombre de molécules de liaison. Les facteurs susceptibles d'affecter le comportement fragile des polyoléfines semi-cristallins sont (d'après Peggs et Carlson, 1990, Lustiger 1996, Bourgeois et Blaket 1989, PPI 1993, Mandelkern 1993, Apse 1989) :

- **La cristallinité** : quand la cristallinité (reliée à la densité) augmente et la quantité de matières amorphes diminue, le nombre de molécules de liaison et par conséquent la résistance à la déformation fragile diminue. Désormais la résistance à la fissuration sous contrainte diminue pour une augmentation de cristallinité.
- **Le poids moléculaire** : plus la chaîne moléculaire est longue, plus le nombre de molécules de liaison ainsi que leur enchevêtrement est important, ce qui augmente la résistance à la fissuration sous contrainte. Le poids moléculaire a été démontré comme étant la propriété du matériau la plus significative. Augmenter le poids moléculaire et en plus, diminuer l'indice de fluidité, augmente la résistance à la fissuration sous contrainte.

- **La distribution du poids moléculaire** : est aussi importante, En effet, la prépondérance d'une fraction élevée du poids moléculaire a un grand effet sur la résistance à la fissuration sous contrainte.
- **Les co-monomères** : Afin d'améliorer la flexibilité et la résistance à la fissuration sous contrainte, le polymère peut être produit à partir du monomère éthylène et d'un co-monomère tel le butène, l'hexène ou l'octène, dans une proportion de 1 à 3 %. La présence de co-monomère augmente cependant la distance entre les chaînes moléculaires polyéthylènes diminuant la densité, augmentant la perméabilité et diminuant la résistance chimique du matériel produit.

## **II.4 Mécanisme de fissuration des géomembranes PEHD**

### **II.4.1 Phénomène**

Le Stress Cracking peut être défini comme une rupture fragile d'un matériau plastique en tension lorsqu'il est en contact avec un milieu particulier en absence duquel aucune rupture n'apparaîtrait dans les mêmes conditions de charge. Ce milieu est constitué de réactifs polaires principalement des tensioactifs mais également des alcools. Ce phénomène est très important, car les deux conditions nécessaires pour le provoquer (contraintes mécaniques et liquide) correspondent à une situation courante dans les décharges où le lixiviat peut contenir des produits tensioactifs (détergents, savons...).

Pour que le phénomène de fissuration sous contrainte puisse avoir lieu, le matériau doit remplir deux conditions : il doit être soumis à une contrainte et doit exister un point d'initiation de la fissure. Le point d'initiation de la rupture peut être une imperfection, une agglomération de noir de carbone, une rayure, mais généralement il semble se localiser au niveau des soudures.

L'initiation du phénomène de fissuration sous contrainte se produit à l'endroit d'une craquelure qui est une micro fissuration non ouverte. Une fois que la fissure sous contrainte est initiée, elle croît perpendiculairement à l'orientation de la contrainte via une série de craquelures.

La tension de rupture périodique des fibrilles dans la craquelure permet la propagation de la fissure. Selon Thomas (1998), la fissuration commence généralement au niveau des bords pour les feuilles lisses, sur les faces pour les feuilles texturées et entre les feuilles dans le cas des soudures (au niveau de la perle de soudage).

Les travaux de Hsuan et Koerner (1991) ont montré que ce phénomène est fonction de la propriété intrinsèque de la résine, entre autres la distribution du poids moléculaire et la densité. Le processus de fabrication, les additifs, l'exposition, les sollicitations mécaniques et le soudage ne peuvent pas générer la fissuration sous contrainte, mais ne font qu'aggraver le phénomène.

La nature des contraintes est souvent le résultat d'une combinaison des contraintes de l'ouvrage en service et des concentrations locales de contraintes. Cette combinaison peut conduire à une initiation de la rupture par fatigue ou à une rupture découlant du phénomène de fissuration sous contrainte (Peggs, 1988).

#### **II.4.2 Les facteurs influençant le phénomène de *Stress Cracking***

En se référant aux études réalisées par Thomas et Deschepper (1993), les principaux facteurs qui peuvent affecter le taux de croissance de la fissuration sont la taille et l'ampleur du défaut, la charge appliquée, la température et la résistance du matériau à la fracturation ainsi que la présence de produits chimiques.

Différents paramètres influençant le comportement au Stress cracking ont été énumérés par Rigo et al. (1999) et Peggs (1999) :

- Les paramètres de structure ont une influence prépondérante sur le comportement du matériau. En pratique, il est difficile de faire varier indépendamment une caractéristique pour en connaître l'influence précise;
- L'histoire thermomécanique (temps, vitesse, pression et température de la transformation) a une influence certaine car elle se traduit par une configuration de structure : orientation, tensions internes, cristallinité;
- Le taux de contrainte est un paramètre important; en dessous d'une certaine contrainte critique, le phénomène ne se produit pas;
- La température est un facteur d'accélération du phénomène.

## **II.5 Prédiction et évaluation de la résistance à la fissuration sous contrainte**

### **II.5.1 Introduction**

L'apparition des fissures sur les géomembranes installées sur sites a poussé l'EPA (l'agence de protection de l'environnement USA) à entreprendre certains projets de recherche dans le but d'évaluer la résistance à la fissuration sous contrainte au moyen de tests de laboratoire. Parmi ces tests, le test ASTM D1693 « *Bent Strip Test* », le test ASTM D 5397 « *Notched Constant Tensile Load (NCTL)* » et son appendix « *single point Notched Constant Tensile Load (SP-NCTL)* » ainsi que le test BAM. Le Tableau II.2 ci-dessous récapitule les différentes conditions expérimentales des tests utilisés pour l'évaluation de la résistance à la fissuration sous contraintes des feuilles.

Les avantages et les inconvénients des essais ASTM sont présentés sur le Tableau II.3



**Tableau II.2 : Conditions expérimentales des différents tests ASTM pour l'évaluation de la SCR**

<b>Paramètres</b>	<b>ASTM D1693</b>	<b>ASTM D5397</b>	<b>ASTM D5397 appendice</b>	<b>BAM Test</b>
<b>Température (°C)</b>	50	50	50	80
<b>Éprouvette</b>	Forme rectangulaire de dimension 38*13 mm	Éprouvette selon ASTM D638 Type IV	Éprouvette selon ASTM D638 type IV	Éprouvette selon ASTM D638 Type I
<b>Charge appliquée (Psi)</b>	Sans charge (pliés à 180°)	20% à 65% de la contrainte à la limite élastique	30% de la contrainte à la limite élastique	580
<b>Bain d'incubation</b>	10% Igepal CO-630 90% eau distillée	10% Igepal CO-630 90% eau distillée	10% Igepal CO-630 90% eau distillée	5% Igepal CA-720 95% eau distillée
<b>Temps de rupture acceptable</b>	Supérieur à 1500 heures	Supérieur à 200 heures	Supérieur à 200 heures	Supérieur à 100 heures
<b>Entaille</b>	Entaille sur la surface	20% de l'épaisseur	20% de l'épaisseur	Sans entaille

**Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des essais ASTM**

<b>Essais</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>ASTM D1693</b>	Très facile à réaliser.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durée du test assez longue (supérieur à 1500 hrs);</li> <li>- Le spécimen est soumis à des contraintes de relaxation ;</li> <li>- Le test est de nature qualitative.</li> </ul>
<b>ASTM D 5397</b>	Présence d'entaille, ce qui va accélérer le test.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La durée du test peut être supérieure à 3 semaines ;</li> <li>- Plusieurs appareils d'essais.</li> </ul>
<b>ASTM D5397 appendice</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence d'entaille, ce qui va accélérer le test ;</li> <li>- Une seule contrainte est appliquée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'initiation naturelle de la fissuration ne peut pas être évaluée ;</li> <li>- Ne s'applique pas aux géomembranes rugueuses ;</li> <li>- Relativement long (8 jours).</li> </ul>

L'essai ASTM D5397 appendice, est le plus couramment utilisé pour l'évaluation de la SCR des résines utilisées pour la fabrication des géomembranes, mais il présente certaines limitations dont l'incapacité de tester les soudures et les géomembranes texturées .

En parallèle de l'ASTM D5397, le BAM ESCR test a été développé en Allemagne par les chercheurs du *Bundesanstalt für Material Und Prüfung*. Il s'agit d'un test à contrainte constante, la température d'essai est assez élevée (80°C). L'essai ne demande pas d'entaille, ce qui permet d'identifier le point d'initiation naturelle de la fissure. Il est relativement rapide étant donné qu'il utilise une température et une contrainte assez élevées.

### **II.5.2 Le rôle du surfactant**

La plupart des essais évaluant la résistance à la fissuration sous contraintes utilisent des solutions d'incubation à base d'eau et d'un surfactant non ionique afin d'accélérer le processus de fissuration. Les types de surfactant utilisés appartiennent à la famille chimique des alkyle phénol éthoxylate, qui varient en fonction de la nature du groupe alkyle et nombre d'éthoxyles présents dans la chaîne principale.

Le mécanisme par lequel l'Igepal accélère la rupture n'est pas encore bien compris. Lagaron et al., (2000) ont montré que les courtes chaînes du surfactant semblent gonfler le polymère en diffusant à l'intérieur, ce qui peut initier les craquelures au niveau de la surface. La diffusion des molécules du détergent dans le polymère due à la présence de contrainte, provoque une augmentation de mobilité des chaînes induisant une réduction de l'énergie d'activation du processus de déformation, c'est à dire empêchant la déformation élastique (Yeh et al., 1994).

Ward et al., (1991), ont expliqué l'influence de l'Igepal par le fait que le fluide est rapidement absorbé dans la région amorphe à l'extrémité de l'entaille. Ceci conduit à une accélération de la croissance des craquelures. La solubilité de l'Igepal diminue pour une augmentation de température. L'effet accélérateur de l'Igepal devient appréciable après 15 heures, il s'agit du temps raisonnable pour que l'Igepal diffuse complètement dans la fente (Ward et al. 1990, Ward et al. 1991, Lustiger et al. 1996).

L'agent actif joue deux rôles dans le processus de croissance lente des fissures. D'une part, il augmente la croissance des craquelures par plastification de la région amorphe. Le surfactant doit diffuser dans les pores de la craquelure afin d'affecter la plastification, ce transport de surfactant n'étant possible qu'en présence d'eau. D'autre part, l'Igepal agit aussi comme un lubrifiant au niveau des fibrilles afin de promouvoir la mobilité des chaînes (Ward et al. 1991; Qian et al.1993; Lagaron et al.2000).

Lustiger (1986) cité dans Ward et al. (1990), a remarqué que l'effet de la concentration de l'Igepal sur le temps de rupture n'est pas appréciable. Ward et al. (1990) ont confirmé cette idée, et ils ont montré qu'excepté les faibles concentrations (entre 0 et 0.1%), la concentration n'a pas d'effet majeur sur les résultats de l'essai.

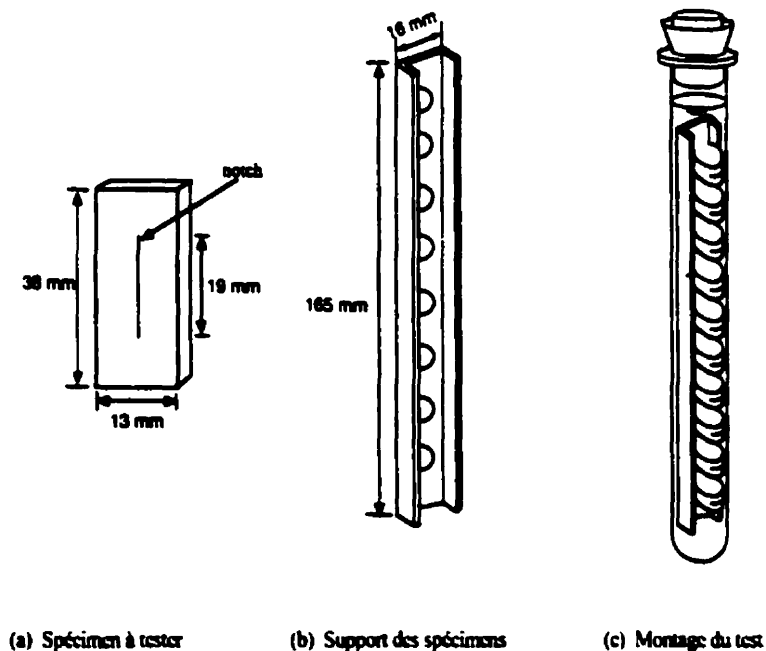
Une des propriétés essentielles pour distinguer les différents surfactants est le point de turbidité (Cloud Point) qui définit la température à laquelle la solution devient turbide suite à une séparation de l'eau de la solution (Rhône Poulenc, 1990). Le surfactant devient insoluble et par la suite inactif pour des températures au-delà du point de précipitation (Othmer, 1997).

Les molécules de surfactant contiennent à la fois des groupements polaires et non polaires, c'est à dire qu'une partie de la molécule est soluble dans l'eau et l'autre ne l'est pas. Toute la molécule est soluble dans l'eau à la température ambiante parce que les groupements polaires interagissent avec les molécules d'eau à travers une faible attraction moléculaire nommée liaison hydrogène (Zoller et Broze ,1999).

### II.5.3 Le test ASTM D1693 « *Bent Strip Test* »

Il s'agit de l'un des premiers tests évaluant la fissuration sous contrainte des polyoléfines. Le but de cet essai est de déterminer la susceptibilité du PEHD à se fissurer sous contrainte en milieu tensioactif.

Une entaille est effectuée tout le long d'un spécimen rectangulaire de dimensions 38\*13 mm, plié à 180° (Figure II.3). Les spécimens sont fixés sur un support métallique puis immergés dans une solution active constituée de 10 % Igepal et 90% d'eau, maintenue à 50°C. Dix spécimens sont placés sur le support (5 pris en sens machine et 5 en sens travers). Dans les conditions de l'essai, de fortes contraintes multi-axiales se développent en introduisant une imperfection contrôlée. La fissuration sous contrainte est plus propice à survenir dans ces conditions.



**Figure II.3 : Le Bent Strip Test (ASTM D1693-97a)**

Quand les fissures apparaissent sur les échantillons, elles se développent du côté de la fissure à proximité du sommet de l'arc et croissent tout le long des côtés. Le critère usuel est d'obtenir un temps de rupture dépassant les 1500 heures d'incubation.

Bien que ce test soit très facile à réaliser, il présente deux problèmes majeurs. D'après Prasad (2000), le *Bent Strip Test*, présente des résultats contradictoires, à cause de l'état de contrainte qui change continuellement durant l'essai, étant donné que les contraintes de relaxation se produisent dès que le spécimen est plié. Le second inconvénient se rapporte à la nature qualitative de ces résultats. En effet, le temps de rupture des échantillons qui ont craqué avant 1500 heures ne peut pas être identifié, on ne peut pas distinguer entre les différents matériaux et par suite il n'est pas efficace pour les résines des géomembranes courantes.

#### **II.5.4 Le test ASTM D5397 « *Notched Constant Tensile Load* »**

Lander (1960) a proposé un test utilisant des éprouvettes intactes placées sous contraintes de tension variable et immergées dans un bain contenant 10% d'Igepal et 90% d'eau à une température de 50°C, afin d'accélérer la fissuration. Ce test est relativement très long, il s'achève après 10000 heures ; une méthode statistique est nécessaire afin d'analyser les résultats ainsi qu'un nombre d'essais plus large pour chaque matériau pour qu'il soit bien évalué. Pour cette raison, le test n'est pas exploitable pour le contrôle de qualité et il a été abandonné. Il a été modifié par le projet EPA : une entaille étant introduite afin de définir un point d'initiation à la fissuration, il s'agit du test avec entaille sous charge constante (*Notched Constant Tensile Load : NCTL*).

L'ASTM D5937 est la méthode standard pour évaluer la résistance à la croissance de fissuration lente, connue sous le nom de fissuration sous contraintes. Le dispositif comporte un bac d'immersion susceptible d'accueillir au maximum 20 éprouvettes tendues à différents pourcentages de leur contrainte d'écoulement (des contraintes variant de 20 à 65 % de la contrainte à la limite élastique avec une incrémentation maximum de 5%).

Les conditions d'incubation spécifiées par la méthode incluent une température constante d'immersion à 50°C et une solution spécifique d'incubation qui consiste en un mélange de 10 % de surfactant (Igepal CO 630) et de 90 % d'eau distillée. La température ainsi que la solution d'incubation ont un effet accélérateur sur le taux de propagation des fissures. L'uniformité des températures au sein du bain est assurée par des courants de convection suffisants.

#### **II.5.4.1 Effet de la température sur le comportement de la contrainte à la limite élastique**

L'essai ASTM D5397 suggère une force constante qui dépend du pourcentage de la contrainte à la limite élastique. Les propriétés de la contrainte à la limite élastique (*yield*) des géomembranes sont évaluées par le test ASTM D638 type IV, à température ambiante. D'après les observations d'une variété de polymères ainsi que l'analyse du comportement de la contrainte à la limite élastique en fonction de la déformation, Lucas et al (1995) ont proposé que la région du *yield* soit constituée de deux pics : le premier correspond à la résistance des cristallites originaux du matériau et le second est induit par la résistance des nouveaux cristallites formés. Généralement, le premier pic est utilisé afin d'analyser l'effet de la température sur la contrainte à la limite élastique.

#### II.5.4.2 Les résultats du test « NCTL »

Les résultats du test NCTL sont présentés par des courbes de pourcentage du yield en fonction du temps de rupture en échelle log-log. En se basant sur les résultats des essais conduits par Hsuan (1998), on remarque que le temps de rupture décroît quand la température augmente, ce qui confirme l'effet accélérateur de la température.

#### II.5.4.3 Interprétations des résultats

Les courbes de réponse typiques sont représentées à la Figure II.4, on distingue deux régions différentes :

- La région ductile
- La région fragile

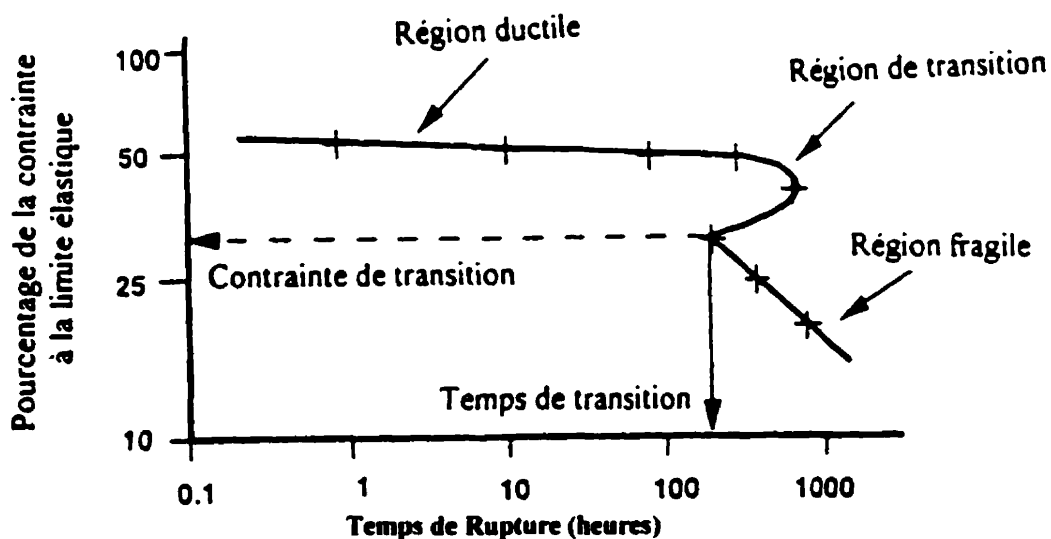


Figure II.4 : Courbe de réponse typique du test NCTL (ASTM D5397-95)



Les spécimens de la région des contraintes les plus élevées avec un temps de rupture court se déforment d'une façon ductile, celles des faibles contraintes et à un temps de rupture faible rompent d'une façon fragile.

L'importance majeure du test NCTL est le début de la région de rupture fragile, qui signifie la transition du matériau à un régime de croissance lente de fissures. Le point de départ de la région fragile est défini comme étant le point de transition à partir duquel l'unique valeur du temps de transition ainsi que de la contrainte de transition peuvent être obtenues.

Les deux comportements ductiles et fragiles sont séparés par une zone de transition qui peut être très abrupte, ayant une forme de nez ou en forme d'une marche (Hsuan et Al. 1993). Le point de transition est défini comme étant le point de départ de la région fragile.

Il existe quatre valeurs quantitatives qui peuvent être déduites des courbes obtenues par le test NCTL :

- la pente de la portion ductile
- la pente de la portion fragile
- le temps de transition
- la contrainte de transition

Les deux valeurs de la pente peuvent être utilisées afin d'évaluer le temps de transition :

$$T_f = \sigma^{(1/s)}$$

Avec :

$T_f$  : temps de rupture en heure

$\sigma$  : contrainte appliquée (pourcentage de la contrainte à la limite élastique)

$S$  : la pente (la portion de courbe considérée)

## II.5.5 Le test SP-NCTL

### II.5.5.1 Conditions de l'essai

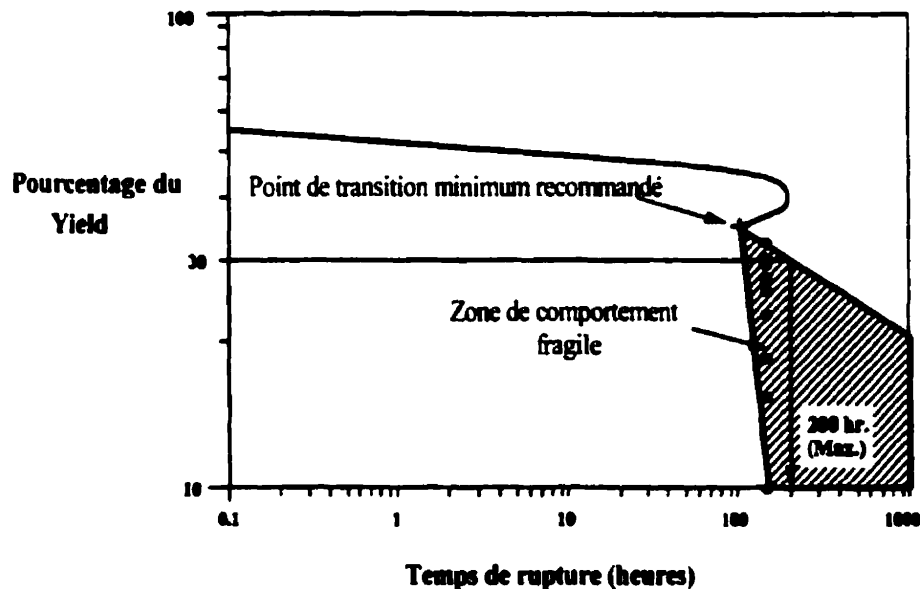
Afin d'obtenir la valeur du temps de transition à partir du test NCTL, un minimum de dix différentes contraintes appliquées doivent être évaluées. Le temps total de l'essai peut être supérieur à trois semaines et plusieurs appareils d'essais sont nécessaires. Ceci n'est pas pratique pour le test de contrôle de qualité, par conséquent une version abrégée du test a été développée. Il s'agit du test SP-NCTL « *Single Point, Notched Constant Load Test* », il est adopté comme un Appendix de l'ASTM D 5397 ; une seule contrainte est appliquée, elle est égale à 30% de la contrainte à la limite élastique. Le siège de ce test se situe au niveau de la portion fragile.

Comme cela a été décrit par Hsuan et Koerner (1995), le concept est de sélectionner des niveaux de contraintes proches, mais légèrement inférieurs à la portion initiale de la région fragile et de spécifier le temps minimum de rupture à cette contrainte.

La Figure II.5 montre la courbe idéale du test NCTL avec un point de transition localisé au niveau du temps de transition recommandé de 100 heures et à la contrainte de transition égale à 35% de la contrainte à la limite élastique.

En utilisant la pente de la zone fragile des essais qualifiés, une zone d'acceptabilité peut être établie, comme illustré sur le graphe par la zone hachurée. Cette zone fragile est utilisée afin de déterminer le temps de rupture minimum pour le test SP-NCTL.

Le niveau de contrainte le plus élevé qui peut assurer une rupture fragile est celui du 30% de la contrainte à la limite élastique ; le temps minimum de rupture doit être 200 heures ou plus.



**Figure II.5 : Illustration de l'essai SP-NCTL (ASTM D5397-95)**  
**(200 heures est le temps recommandé à 30% de la contrainte à la limite élastique)**

#### II.5.5.2 Les facteurs influençant les résultats de l'essai SP-NCTL

Plusieurs facteurs qui influencent les résultats du test SP-NCTL ont été identifiés par Bobsein (1999), et se résument en :

- **Les caractéristiques de la résine** : la densité, le poids moléculaire, les additifs et le niveau d'oxydation. La densité de la résine présente le paramètre majeur qui influence le stress cracking : les résultats du test SP-NCTL tendent à croître quand la densité diminue.

- **Les paramètres du processus d'extrusion** : l'épaisseur, l'orientation et le noir de carbone. L'épaisseur améliore la résistance, ainsi que l'orientation par rapport à la ligne d'extrusion. La présence de noir de carbone tend à diminuer les résultats.
- **Les paramètres du test** : la charge appliquée, les variations de profondeur d'entaille et les défauts du spécimens tels que la présence d'impuretés, les imperfections de surface, les variations d'épaisseur et la concentration de contrainte. Les variations de l'entaille représentent le paramètre principal qui influence les résultats du test. Hsuan (1995) exige une variation de la profondeur de l'entaille inférieur à  $\pm 0.05\text{mm}$ .

### **II.5.5.3 Limitations**

Le « SP-NCTL » est un essai efficace pour évaluer la résistance à la fissuration sous contrainte des résines utilisées pour la fabrication des géomembranes, mais il présente certaines limitations.

Tant qu'une entaille est nécessaire afin d'accélérer le processus, l'initiation naturelle de la fissuration au point de contraintes le plus élevé ne peut pas être évaluée. De plus il a une utilisation limitée comme outil de contrôle qualité parce qu'il est relativement long (8 jours). Il faut noter aussi que ce test ne s'applique pas aux géomembranes texturées ni aux soudures.

### **II.5.6 Le test BAM**

L'essai consiste à découper des spécimens selon la méthode ASTM D638 type I, ensuite les attacher dans l'appareil d'essai, puis les immerger dans une solution d'incubation constituée de 5% Igepal CA-720 et de 95% d'eau désionisée maintenue à une température de 80°C tout en appliquant une charge constante égale à 4 MPa (580 Psi).

Ce test est relativement très accéléré et enveloppe une combinaison de facteurs qui n'existent pas nécessairement dans l'environnement. La température est l'un des facteurs les plus importants, étant donné que la vitesse d'une réaction chimique double pour une augmentation de 10°C. Ceci nous amène à dire qu'à 80°C le test est accéléré 48 fois comparé à la température ambiante (25°C). Le surfactant lui aussi fait accélérer l'essai de 40 fois en comparaison avec l'essai réalisé dans l'eau pure, (Thomas et DeSchepper, 1993).

Si on suppose que la charge appliquée sur la géomembrane est de 25% de la force à la limite élastique et que le facteur d'accélération totale est de 1920 fois ( $48 \times 40$ ) ; ceci suggère que 100 heures d'essai correspondent environ à 22 années sur site (Thomas et Deschepper, 1993).

En comparant les temps de rupture obtenus avec cet essai à ceux de l'ASTM D5397 réalisés à 80°C, Thomas et Siebken (1997) ont montré que le test est accéléré au minimum 8 fois quand il est réalisé à 80°C et à 20% de la contrainte à la limite élastique, ceci signifie que 200 heures pour l'essai ASTM (50°C), est à peu de près équivalent à 25 heures dans l'essai BAM (80°C).

## CHAPITRE III

### CARACTÉRISATION DES SOUDURES DOUBLES PAR FUSION

#### III.1 Étude du comportement des soudures

La performance d'une géomembrane est directement liée à la qualité du joint. De toute évidence, le soudage induit des changements structuraux dans la zone qui a été fondue. La limite entre la zone qui a été fondue et le reste de la géomembrane doit être assez brutale, du fait de la faible conductivité thermique de la géomembrane PEHD. Durant la phase de soudage, le cycle de réchauffement - refroidissement peut altérer sévèrement la morphologie des deux feuilles de géomembranes adjacentes au joint en formant une nouvelle orientation moléculaire parallèle à celle-ci. Le soudage change la microstructure du polymère et son orientation dans la partie portée à fusion. D'après Sarazin (1998), cette variation de la microstructure est directement dépendante des paramètres de soudage, à savoir la température de l'élément chauffant, la vitesse du soudage et la force appliquée.

Plusieurs publications ont traité du comportement des soudures, parmi lesquels les travaux de Halse et al (1990), Peggs et Carlson (1990), Lefebvre (1991), Struve (1993), le groupe BAM (1994), Maranda (1995), Luders (1998) et Sarazin (1998). Ils ont mis en évidence que le matériau qui est le plus modifié par le soudage est la matière à la surface des feuilles poussée en dehors de la soudure par les rouleaux de pression « *squeeze out* », qui semble être le point de faiblesse de la structure de la soudure. Ils ont observé aussi que la majorité des fissures se localisent généralement près de la zone où débute le bourrelet de soudage (la perle de soudage) et qu'elles se propagent perpendiculairement à la direction des contraintes appliquées.

### **III.2 Les essais destructifs de pelage et de cisaillement**

#### **II.2.1 Description des essais**

Les joints effectués sur site doivent être testés afin de vérifier l'imperméabilité de la géomembrane et aussi de leur résistance au cisaillement. Ces efforts sont imposés durant l'installation, et probablement par la suite durant la période de service de la cellule (le remplissage du site). Ils résultent de l'action des vents, du poids du matériel, des contractions thermiques, du vieillissement de la membrane, de la pression hydrostatique, du poids de la protection des déchets, du drainage du lixiviat, de l'eau de ruissellement et de la compaction des assises (Rollin 1998).

Le contrôle de qualité d'une soudure est basé généralement sur les essais destructifs : essai de cisaillement et de pelage. L'essai de cisaillement est destiné à évaluer le niveau de résistance d'un joint en essayant de reproduire à l'échelle de l'échantillon, les sollicitations les plus défavorables auxquelles il est soumis en service, qu'elles soient d'origine mécanique ou thermique.

L'essai de pelage, quant à lui, est un moyen d'évaluation de la qualité de la fusion entre les feuilles de géomembranes, il permet essentiellement d'estimer le niveau d'adhérence entre les feuilles. Il est généralement admis que les forces de pelage ne se produisent pas sur site durant la construction et la durée de vie de ce dernier.

Ces essais destructifs sont généralement réalisés afin d'avoir des mesures quantitatives sur la résistance de la soudure à long terme. L'analyse des ruptures réalisée par Sarazin (1998) tend à prouver que les essais de cisaillement et de pelage tels qu'ils sont définis actuellement ne sont des outils d'évaluation de la qualité des soudures qu'au moment de leur réalisation.

L'essai de pelage a fait l'objet de nombreuses recherches et publications durant les dernières années. Les travaux de Lefebvre (1991) ont démontré que cet essai ne constitue pas un critère de résistance. Ainsi, si cet essai demeure nécessaire pour évaluer les joints en terme de soudage ou de simple collage, il n'est pas dans sa définition actuelle apte à différencier les conditions de soudage, ni à évaluer la qualité réelle à long terme des joints (Sarazin, 1998). De plus, d'après Peggs et Rollin (1994), l'essai de pelage n'évalue pas la résistance de toute la largeur de la soudure.

### **III.2.2 Critiques des essais destructifs**

Les critiques fondamentales qui ont été formulées à l'égard des essais de cisaillement et de pelage portent sur leur inaptitude à prédire les performances à long terme des joints de géomembranes.

Certains auteurs ont prouvé que les essais destructifs sont fondamentalement des essais servant à partager entre une bonne et une mauvaise soudure en terme d'adhésion. Ces essais sont incapables de distinguer entre les bonnes soudures, ne caractérisent pas adéquatement les changements de structure moléculaire. Or, il semble important de connaître le comportement à long terme des soudures (Peggs et Rose 1985, Peggs 1997; Lefebvre, 1991; Maranda, 1995; Sarazin, 1998 et Luders, 1998).

Les essais destructifs ont été critiqués par Cadwallader et Jett (1997) et Cadwallader (1998). Pour ces derniers les essais de pelage et de cisaillement sont la cause de nombreux problèmes, les morceaux de soudure découpés pour ces tests seront remplacé par des morceaux de géomembrane soudés par extrusion (ajout d'un extrudat).



Ainsi cette nouvelle soudure n'est pas contrôlée, et qui plus est, la technique utilisée a été souvent qualifiée (Thomas,1998), de moins performante vis à vis du soudage par élément chauffant. De plus, Sarazin (1998) a montré que les soudures surchauffées étant visiblement de faible qualité (présence d'ondulations à la surface) pouvaient être considérées comme correctes par l'essai de pelage.

### **III.3 Essais thermiques**

Maranda (1995) et Sarazin (1998) ont suspecté que le soudage introduit des modifications structurales du matériau par rapport à la feuille issue de l'extrusion, notamment au niveau du taux de cristallinité.

Les essais thermiques ont pour objectifs d'approcher les conditions en température pendant le soudage, puis d'évaluer les possibles modifications morphologiques du polymère. L'application de l'analyse enthalpique différentielle DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) permet une évaluation quantitative et qualitative de transformation de phases et peut offrir des informations quantitatives sur les changements de température des polymères suite à des changements physiques et chimiques. L'avantage de cette méthode est que les conditions de chauffage et de refroidissement sont connues de manière précise. L'inconvénient majeur est que les cycles thermiques sont différents de ceux des conditions de soudage (Sarazin,1998).

Cadwallader et Burkinshaw (1991) ont analysé les variations moléculaires et rhéologiques d'échantillons de géomembranes en PEHD après soudage, par DSC, par chromatographie d'exclusion sur gel (GPC) et par spectrométrie (RMS). Ils ont conclu que les effets du soudage sur la structure de la géomembrane étaient minimes, avec une variation insignifiante du taux de cristallinité.

Cependant d'après Sarazin (1998), la méthode de prélèvement d'échantillon pratiquée par Cadwallader et Burkinshaw (1991) n'est pas appropriée. Dans le cas des soudures doubles par fusion, les résultats ne prennent pas uniquement en compte la zone qui a été fondue pendant le procédé de soudage.

Maranda (1995) a mesuré la cristallinité en fonction de la localisation des échantillons par rapport au centre de la soudure, suivant le plan de la feuille, par la méthode DSC et de la colonne à gradient de densité. Il a observé une diminution de cristallinité à 1 cm du centre de la soudure.

L'analyse par DSC réalisée par Sarazin (1998) montre que les différents cycles thermiques ont une influence sur la structure du polyéthylène, en particulier une augmentation du taux de cristallisation. Par ailleurs, les résultats du temps d'induction à l'oxydation (OIT) montrent que la stabilisation du polymère n'est plus assurée pour les essais de simulation. Les valeurs d'OIT sont toujours inférieures à celle de la géomembrane initiale.

Ainsi, le procédé thermique, et par extension le procédé de soudage entraînent une diminution de la quantité d'antioxydants. Sarazin (1998), a prouvé que même si elle a déjà été utilisée pour évaluer les soudures de géomembrane, l'application de la DSC reste à approfondir. Il pense qu'avec une méthode convenable de prélèvement d'échantillons dans la soudure, il serait possible de trouver les conditions de soudage pour lesquelles la morphologie du polymère est la moins modifiée. Aussi, les conditions qui altèrent thermiquement la géomembrane pourraient être repérées.

### **III.4 Évaluation de la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures**

#### **III.4.1 Description du phénomène**

La fissuration sous contrainte résulte notamment du poids des déchets ou du liquide contenu dans les bassins, des tassements du sol de fondation et des variations thermiques dues aux variations climatiques. Ces contraintes s'ajoutent aux contraintes résiduelles générées par l'opération de soudage. En effet, toute discontinuité géométrique dans le profil d'une soudure et toute imperfection sont des lieux privilégiés d'apparition de ce phénomène (Rollin, 1998).

Cette méconnaissance de l'opération de soudage et l'incertitude de son contrôle se rencontrent fréquemment dans le domaine de la géotechnique. De nombreuses publications ont traité de ce sujet et on dénombre une multitude de facteurs qui sont responsables ou supposés responsables de la rupture. L'opération de soudage induit dans la géomembrane un gradient de contraintes. Rollin et al. (1998) ont montré que les chocs thermiques durant le soudage peuvent initier la fissuration sous contrainte. Halse et al. (1990) ont observé que la majorité des fissures sont initiées par la formation de craquelures au point de concentration de contraintes élevées, ces craquelures sont dues à une géométrie irrégulière des soudures.

Le *stress cracking* survient très souvent à proximité des soudures des géomembranes. Cela n'a rien d'étonnant d'après Rigo et al. (1999) : d'une part, on imagine facilement que cette zone subit, lors de l'opération de soudage, certaines modifications susceptibles de changer le comportement du matériau (modifications engendrées par l'énergie thermique apportée lors du soudage) et d'autre part, dans cette région, on voit apparaître des griffures réalisées par les molettes de l'appareil de soudage lors du serrage des deux lés.

Rollin et al. (1989), Struve (1993) et Sarazin (1998) ont signalé qu'un choix inadéquat des paramètres de soudage pouvait conduire au développement du *stress cracking*. La surchauffe du matériau détruit une partie du polymère et donc fragilise la géomembrane. Rollin et al. (1993) ont entre autre démontré que les paramètres de soudage tels que la vitesse de soudage, la température et la force des rouleaux peuvent affecter la structure du polymère qui en conséquence va modifier la résistance du matériau.

La résistance à la fissuration sous contrainte des soudures est définitivement basée sur la résistance à la fissuration sous contrainte de la feuille ainsi que la quantité de contraintes placées sur la soudure durant le processus de soudage (Thomas et al. 1995).

Suite à l'examen de la microstructure des surfaces des fractures des soudures au moyen d'un microscope électronique à balayage (SEM), Halse et al. (1990) ont défini 5 groupes de morphologie de surface :

- En courtes fibrilles qui sont à l'origine de la croissance lente des fissures à faibles contraintes;
- En fibrilles longues causant une croissance lente des fissures à contraintes modérées;
- En écailles (*flakes*) résultant d'une propagation rapide de fissures à contraintes élevées.
- En plumes (*hackles*), due à de fortes contraintes conduisant à une rupture globale du plastique;
- En lamelles, la cause de ce type de rupture est probablement due à une combinaison de croissance lente de fissure à faibles contraintes et une rupture locale du plastique.

Dans le cas des soudures par fusion au moyen d'un élément chauffant, la surface de fracture commence par une région ductile étroite, qui change en une section plus large ayant une morphologie de longues fibrilles, ceci est dû à des contraintes modérées. Finalement, elle se transforme en une structure « en plume », suivie par une rupture globale du plastique quand les contraintes deviennent très élevées suite à une diminution de section (Halse et al. 1990).

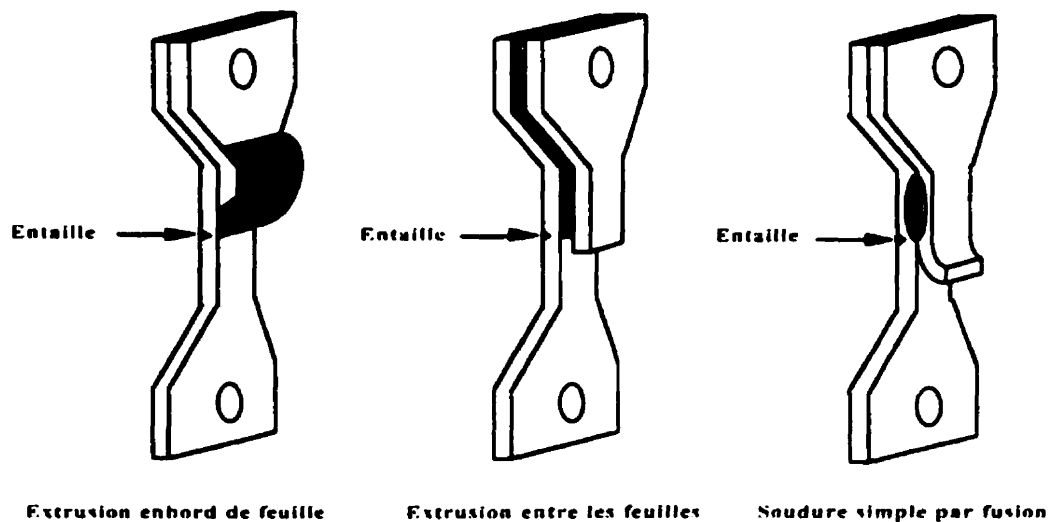
#### **III.4.2 Les différents tests d'évaluation de la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures**

Des essais accélérés en laboratoire ont été développés par Carlson et al. (1993), Thomas et al. (1993) et Thomas (1998), afin de reproduire le phénomène de fissuration sous contrainte des soudures et par suite évaluer leur comportement à long terme.

L'essai ASTM D1693 ne permet pas de tester les soudures, le document normalisé stipule que l'épaisseur maximale des échantillons ne doit pas dépasser 1.5 mm, or la soudure est presque deux fois plus épaisse, ce qui rend l'échantillon impossible à ajuster dans le porte échantillon.

##### **III.4.2.1 Le test SCTL : « *Seam Constant Tensile Load* »**

L'essai pratiqué sur une soudure soumis à une charge constante (SCTL) permet d'évaluer la qualité des soudures afin de voir si elles se comportent de la même façon que les feuilles suite à l'application d'une contrainte de fissuration. La taille de l'éprouvette est celle prescrite par la méthode ASTM D 1822. Une entaille de profondeur 20 % de l'épaisseur totale de la feuille est introduite sur la surface de la feuille opposée à la jonction de la soudure (Figure III.1).



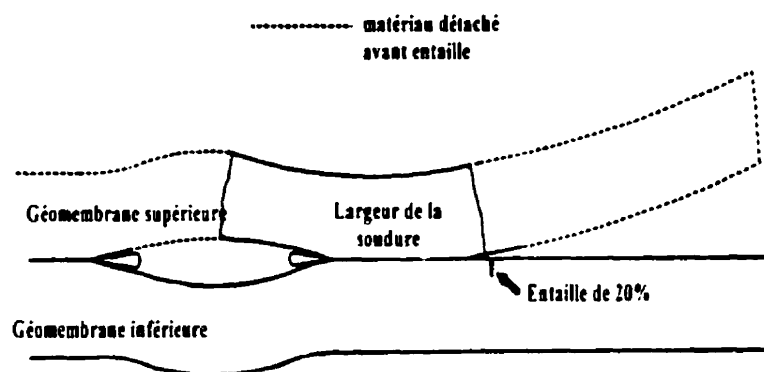
**Figure III.1 : Placement d'entaille sur les spécimens, Seam Constant Tensile Load (GRI Test Method GM5, 1998)**

Les spécimens ainsi préparés sont montés sur un support puis immergés dans une solution d'incubation constituée de 10% Igepal CO-630 et de 90% d'eau distillée maintenue à 50°C. Une charge égale à 30 % de la contrainte à la limite élastique est appliquée. Le temps de rupture minimum recommandé est de 200 heures. Il s'est avéré que ce test n'est pas très efficace pour évaluer les variations de soudage ainsi que la qualité des nouvelles soudures telles que les soudures par double fusion (GRI-13, 1998).

Carlson et al. (1993) ont réalisé une série de tests de fissuration sous contraintes sur plus de 300 échantillons prélevés sur site. Pour les échantillons prélevés (soudures et feuille vierge), ils ont utilisés la découpe ASTM D638 type IV, afin de pouvoir comparer entre les tests avec et sans soudures.

Les spécimens des soudures sont taillés comme le montre la Figure III.2, au niveau de la surface de la géomembrane inférieure adjacente à la perle de soudage. D'après Peggs et Carlson (1990), il s'agit de la localisation prédominante de la fissuration sous contrainte.

La profondeur de l'entaille est de 20% de l'épaisseur de la géomembrane, les échantillons sont immergés dans un bain d'incubation composé de 1% Igepal CO-630, maintenue à 50°C sous une charge constante comprise entre 13 MPa et 15 MPa (1900-2200 psi). Ce test s'est avéré incapable de différencier entre les spécimens avec et sans soudure.



**Figure III.2 : Section en coupe d'une double soudure par fusion montrant la localisation de l'entaille (Carlson et al. 1993)**

### **III.4.2.2 Le test BAM**

Thomas et DeSchepper (1993) ont été les premiers à évaluer la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures au moyen de l'essai BAM. Ce test permet d'évaluer la résistance à la fissuration sous contrainte au niveau des soudures doubles par fusion, en outre, il renseigne sur le point d'initiation naturel de la rupture.

Dans ce même contexte, Thomas et al. (1995) ont observé que certaines soudures rompent plus rapidement que d'autres, en effet, ceci a été associé à la résistance à la fissuration sous contrainte de la feuille de base (propriétés de la résine). Les soudures faites à partir d'une résine de mauvaise qualité (temps de rupture inférieur à 200 heures suivant ASTM D5397) se rompent plus rapidement que celles faites à partir d'une bonne résine.

Thomas (1998) a réalisé l'essai BAM sur quatre type de soudures qui se distinguent par la nature de la surface et la technique de soudage : lisse/fusion, lisse/extrusion, texturée/fusion et texturée/extrusion. Les résultats des essais présentés sur le Tableau III.1 montrent que la technique de soudage par extrusion fournit des soudures plus susceptibles à la fissuration sous contrainte que celles par fusion. En effet, presque la totalité des soudures par fusion testées ont dépassé les 300 heures par contre, rare sont celles qui ont dépassé les 200 heures dans le cas des soudures par extrusion. Les soudures lisse par fusion offrent les meilleurs temps de rupture.



**Tableau III.1: Les moyennes des temps de rupture sur 43 échantillons de soudure  
(d'après Thomas 1998)**

	Lisse/Fusion	Texturée/Fusion	Lisse/Extrusion	Texturée/Extrusion
< 100	3 (20%)	3 (27%)	5 (72%)	2 (20%)
100-200	1 (7%)	2 (18%)	1 (14%)	4 (40%)
200-300	3 (20%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (20%)
> 300	8 (53%)	6 (55%)	1 (14%)	2 (20%)

Suite à cette série d'essai, Thomas (1998) a identifié trois localisations de rupture au niveau des soudures double par fusion :

- 1- Une fissure qui se localise au sommet de la feuille, au niveau de la perle de soudage : ce mode est observé sur 64% des échantillons testés;
- 2- Pour 24% des soudures testées, la fissure se situe au niveau de la perle de soudage, mais sur la feuille postérieure;
- 3- Pour le reste des éprouvettes (12%), la fissure se place sur la feuille loin des joints.

### **III.5 Conclusion**

L'introduction des géomembranes dans le domaine du génie civil et de l'environnement depuis quelques années a mis à la disposition des concepteurs un nouvel outil qui peut constituer une solution aux problèmes environnementaux et de gestion de l'eau. Ces matériaux présentent de nombreux avantages par rapport à leur alternative naturelle respective, soit au niveau de la performance, de l'économie de l'espace, du coût et de la disponibilité.

Durant l'installation d'une couche d'étanchéité, une étape importante est la vérification des soudures, juste après le soudage. Celles-ci doivent être continues, c'est à dire ne pas permettre le passage de liquide, mais aussi elles doivent être capables de transférer les forces de tension de feuille en feuille. Les géomembranes sont sujettes à la fissuration fragile, phénomène qui se développe lentement sous contrainte imposée appelée communément *Stress Cracking*. C'est une fonction synergique de la contrainte appliquée, de la température et de plusieurs paramètres du matériau : densité, cristallinité, poids moléculaire, etc.

Il semble que les fissures se produisent préférentiellement à faible distance des joints, il s'agit de la zone la plus sollicitée lors de l'installation des géomembranes. De plus, l'opération de soudage induit une variation des propriétés du polymère, qui dépendent des conditions de soudage. La surchauffe, les forts gradients thermiques générés et les pressions "d'homogénéisation" trop élevées, tendent à accentuer les contraintes résiduelles qui peuvent favoriser la fissuration sous contrainte.

Les essais de pelage permettent de vérifier s'il y a bien soudage et non simple collage, en mesurant la force d'adhésion. Par ailleurs, aucun essai n'existe pour évaluer la qualité réelle des soudures, et avoir ainsi une idée de leur comportement à long terme. Les études sur les essais de fissuration sous charge constante sur les géomembranes PEHD ont montré leur efficacité. Il semble possible d'adapter ce type d'essai aux soudures.

## **CHAPITRE IV**

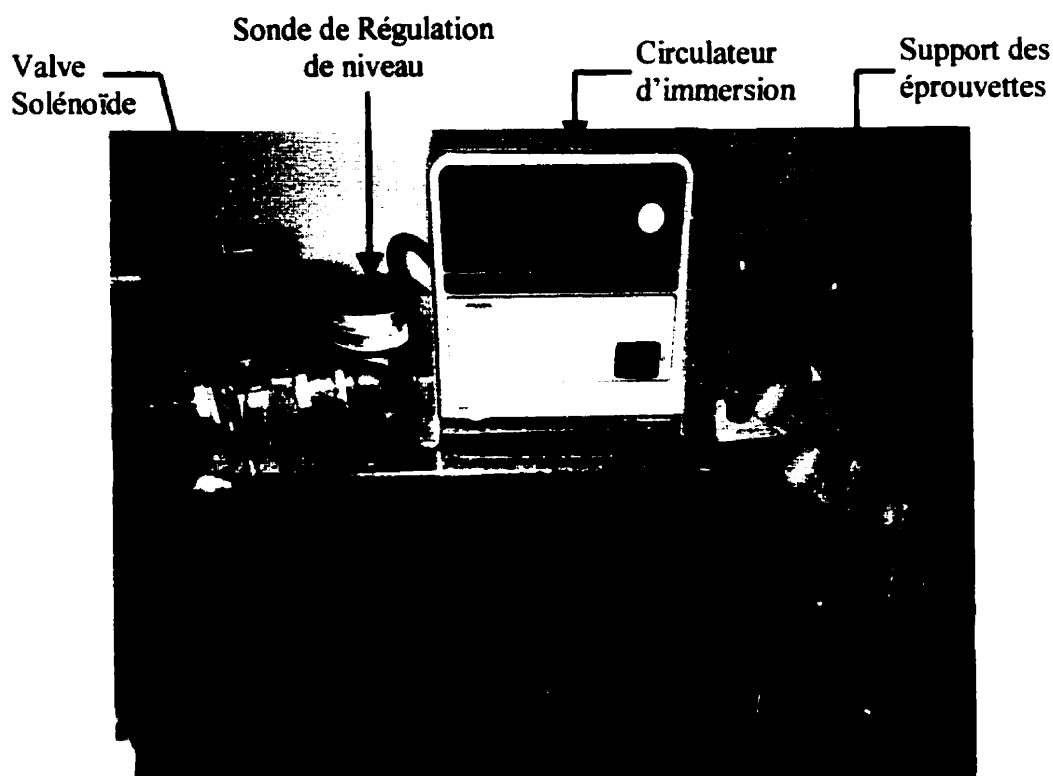
### **CONCEPTION DU BANC D'ESSAI DE FISSURATION SOUS CONTRAINTE**

#### **IV.1 Idées générales**

L'équipement standard requis pour la réalisation des essais de fissuration sous contrainte est décrit dans la norme ASTM D5397. Il s'agit d'un dispositif permettant de soumettre l'éprouvette simultanément à une contrainte de traction constante et à l'action de l'environnement chimique. Les parties du dispositif en contact avec le produit chimique doivent être fabriquées en matière inerte vis à vis de celui ci, tels que l'acier inoxydable.

Le banc d'essai est formé de quatre parties majeures présentées sur la Figure IV.1 :

- Le bain d'incubation ;
- Le circulateur d'immersion ;
- Les supports des échantillons ;
- Le régulateur de niveau.



**Figure IV.1 : Banc d'essai développé pour la mesure du *stress cracking***

#### **IV.2 Le bain d'incubation**

Étant donné la température élevée de l'essai ainsi que le caractère agressif du surfactant, le bain d'incubation a été fabriqué en acier inoxydable. C'est un bain de dimensions internes : 65×26×34cm (longueur×largeur×hauteur) capable de contenir 50 litres de solution d'incubation (eau et surfactant).

L'isolation du bassin est nécessaire afin de stabiliser la température et limiter les pertes de chaleur. Pour ce fait, un revêtement de bois et de laine autour du bassin a été appliqué.

Le bain d'incubation a été dimensionné pour contenir quatre supports d'échantillons susceptibles de contenir chacun cinq spécimens par support. Il est muni de plusieurs accessoires afin d'assurer la régulation de la température et du niveau d'eau dans le bassin.

#### **IV.2.1 Le circulateur d'immersion**

Le chauffage de la solution contenue dans le bassin se fait au moyen d'un circulateur d'immersion, muni d'une pompe de circulation qui crée des courants de convection afin d'assurer l'homogénéité dans tout le bassin. Celle-ci est équipée d'un thermostat qui permet de stabiliser les températures de l'essai.

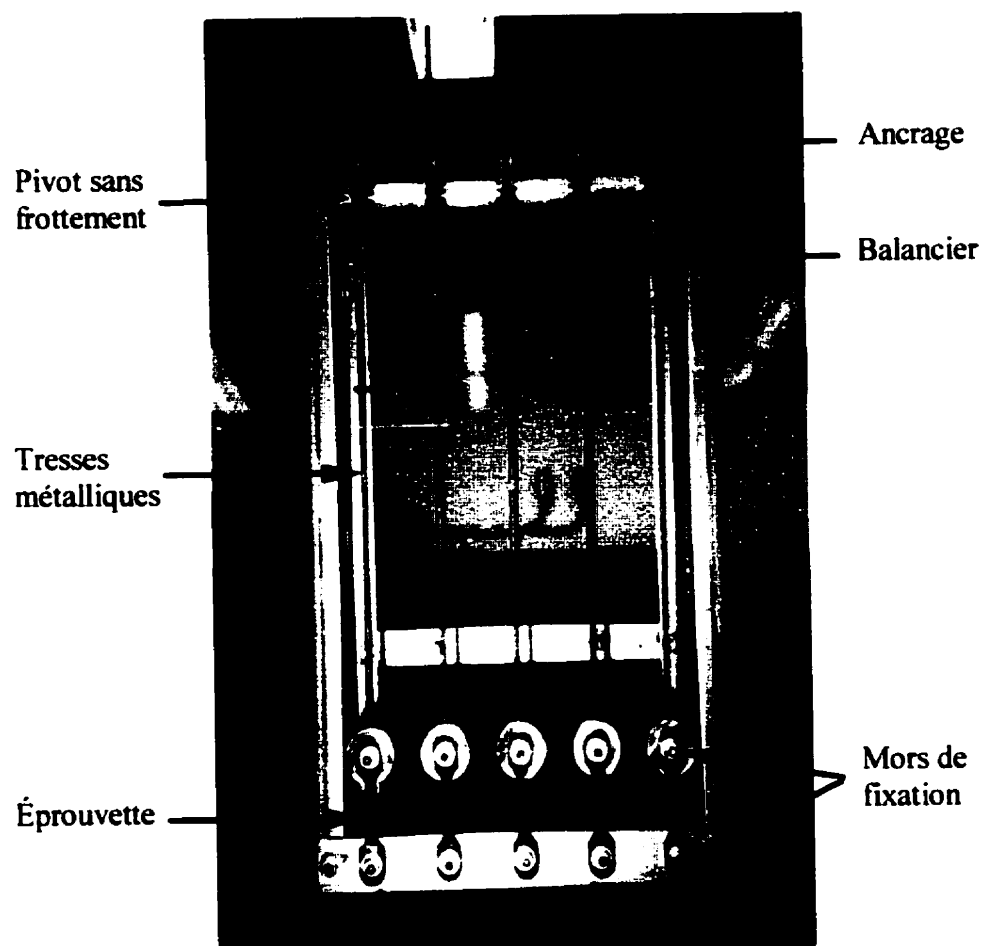
Cette résistance chauffante peut atteindre des températures assez élevées allant jusqu'à 150°C, avec une précision de  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ .

#### **IV.2.2 Régulateur de niveau**

En plus du système thermique, un système de régulation du niveau est indispensable afin de compenser l'évaporation. Le contrôle du niveau de la solution contenue dans le bassin est assuré au moyen d'une sonde de niveau qui déclenche une vanne solénoïde.

#### **IV.3 Le support des échantillons**

Les échantillons sont maintenus sur un support en acier inoxydable. Chaque support est composé de 5 stations distinctes. Celles-ci doivent être totalement immergées au sein de la solution d'incubation. La Figure IV.2 illustre les différentes composantes du support d'éprouvette.



**Figure IV.2 : Composantes du support des échantillons**

#### IV.4 La charge appliquée

La charge est appliquée tout le long de l'axe de traction du spécimen au moyen d'un bras de levier, induisant des contraintes de tension qui en combinaison avec l'agent agressif, provoquent la fracture du spécimen au niveau de l'entaille. Cette charge est placée à l'extrémité de chaque balancier.

D'après ASTM F17.40 (2000), Pour chaque spécimen, on mesure au moyen d'un micromètre, la largeur (W) et l'épaisseur (T). La charge appliquée est calculée à partir de l'équation (1) :

$$\text{Charge appliquée (lbs)} = (S \cdot T \cdot W - CF) / MA \quad (1)$$

S : contrainte appliquée (psi ou Mpa)

T : épaisseur du spécimen (in ou mm)

W : largeur du spécimen (in ou mm)

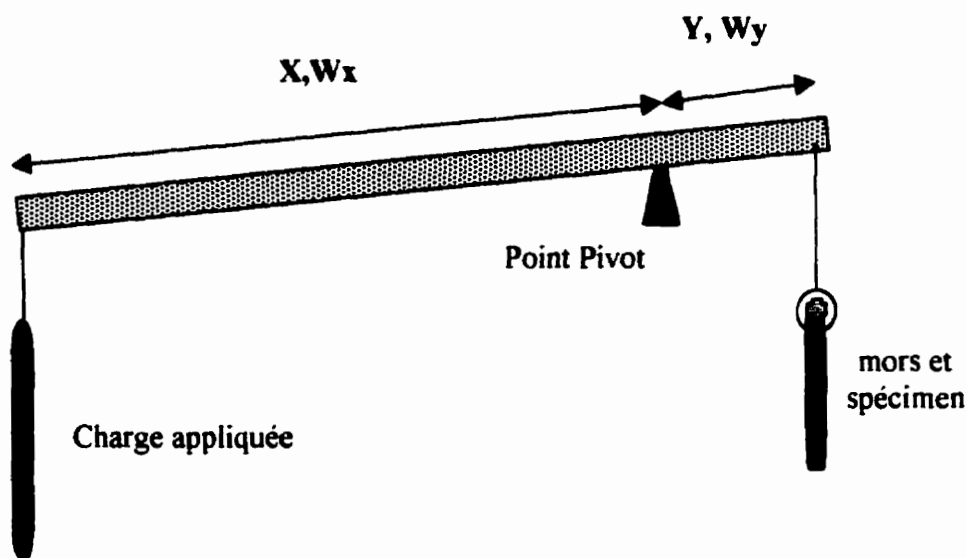
MA : avantage mécanique de l'appareil

CF : facteur de correction du bras de levier

Ce facteur est calculé comme suit :

$$CF = (1/MA) [ (W1+W_y/2) - W_x/2 ] \quad (2)$$

W1, W<sub>y</sub> et W<sub>x</sub> sont représentés sur la Figure IV.3



**Figure IV.3 : Bras de levier et calcul de la charge appliquée**

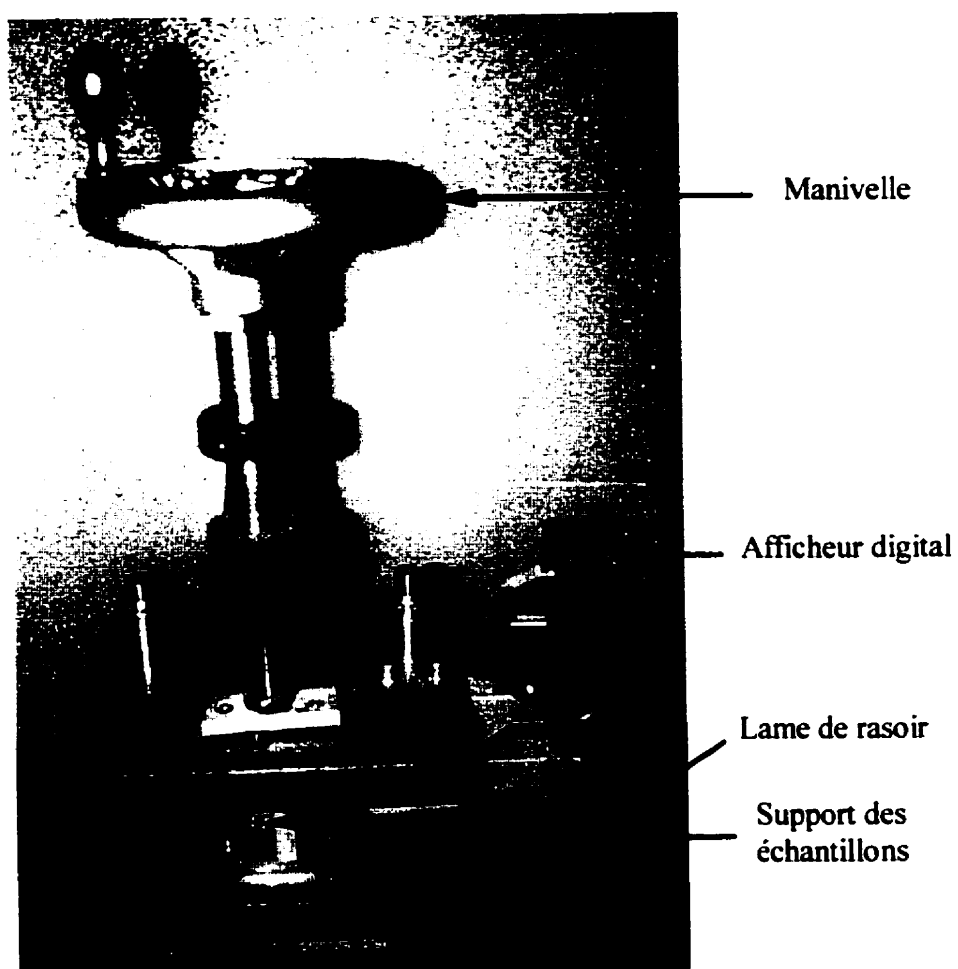
Pour  $X = 20.2 \text{ cm}$  ;  $Y = 3.8 \text{ cm}$  ;  $W1 = 45.4 \text{ g}$  ;  $MA = 5$  ; d'où  $CF = 170 \text{ g} = 0.374 \text{ g}$

#### **IV.5 La machine à entaille « *Notching Device* »**

Selon ASTM D5397, une entaille est suggérée dont le but est d'initier la propagation du stress cracking ou encore réagit comme un point d'initiation pour une propagation potentielle de fissures à travers le matériau. Cette entaille permettra la pénétration du surfactant à l'intérieur de la géomembrane et par suite l'accélération de l'essai. La machine à entaille utilisée est présentée sur la Figure IV.4.

L'entaille est coupée normale au plan du spécimen, elle est introduite sur une face des échantillons au moyen d'une lame de rasoir installée sur un support mobile. La profondeur de celle-ci est contrôlée par un micromètre ayant une précision de  $0.01 \text{ mm}$ .





**Figure IV.4 : Machine à entaille utilisée “*Notching Device*”**

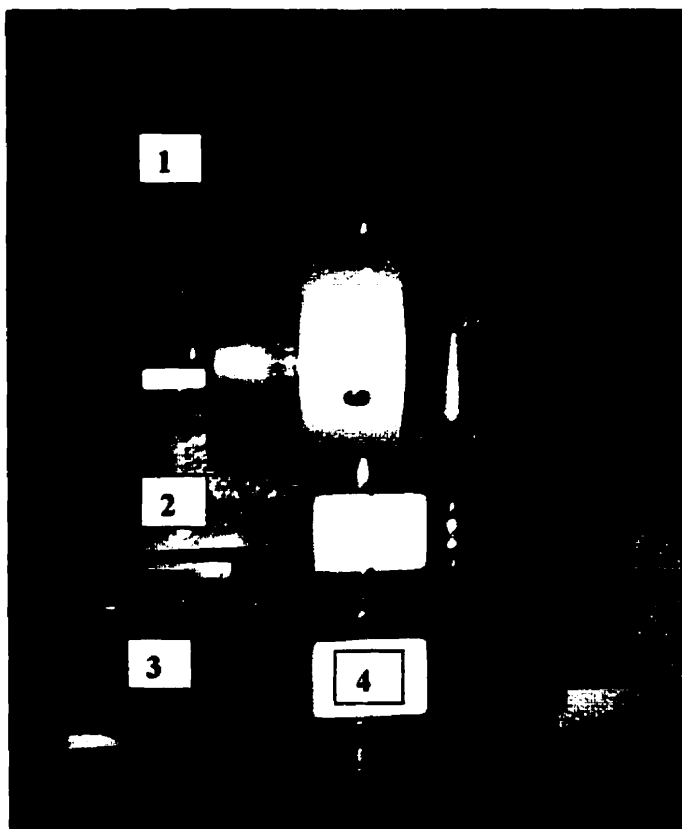
#### **IV.5.1 Les problèmes rencontrés**

L'observation au moyen d'un microscope optique d'une entaille faite par la machine actuelle, montre une marge d'erreur comprise entre 2 et 14%, dépendant de la localisation de l'échantillon à analyser.

Cette grande marge d'erreur est due à plusieurs contraintes liées à la conception de la machine ainsi qu'à la manipulation de l'essai. En effet, la valeur indiquée sur l'afficheur digital ne se stabilise pas, même après avoir soulevé la main de la manivelle. Ceci est dû au poids exercé par cette dernière sur l'échantillon, ainsi que la poussée exercée par le spécimen sur la lame. La valeur affichée n'est jamais celle de la profondeur que l'on veut atteindre, notant que ASTM exige une marge de variation de 2 mil (0.05mm).

À ceci s'ajoutent les irrégularités observées au niveau de la lame et du support des échantillons, les fortes vibrations ressenties en tournant la manivelle, l'hétérogénéité du matériau et la non planéité des surfaces à entailler.

La Figure IV.5 récapitule l'ensemble des défauts détectés sur la machine actuelle



**Figure IV.5 : les défauts observés sur la machine à entaille**

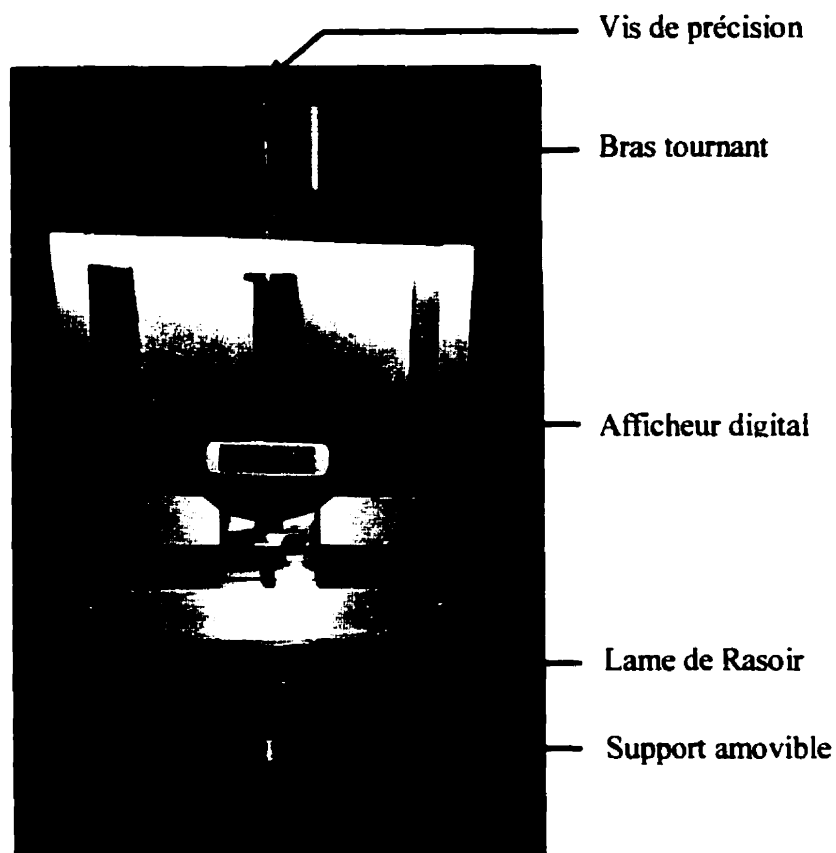
- 1 : Vibration importante du socle
- 2 : Non-parallélisme de la lame avec le support
- 3 : Irrégularités au niveau du support des éprouvettes
- 4 : Très sensible

#### **IV.5.2 Les améliorations suggérées**

En raison des lacunes observées lors de la réalisation des entailles, certaines améliorations sont recommandées afin d'avoir une meilleure précision de profondeur de l'entaille. La manivelle n'est pas pratique, et son poids ainsi que le poids de la main de l'opérateur peuvent fausser les profondeurs d'entaille. Il sera plus pratique d'utiliser un bras tournant sur le côté ce qui minimiserait la force exercée sur l'échantillon.

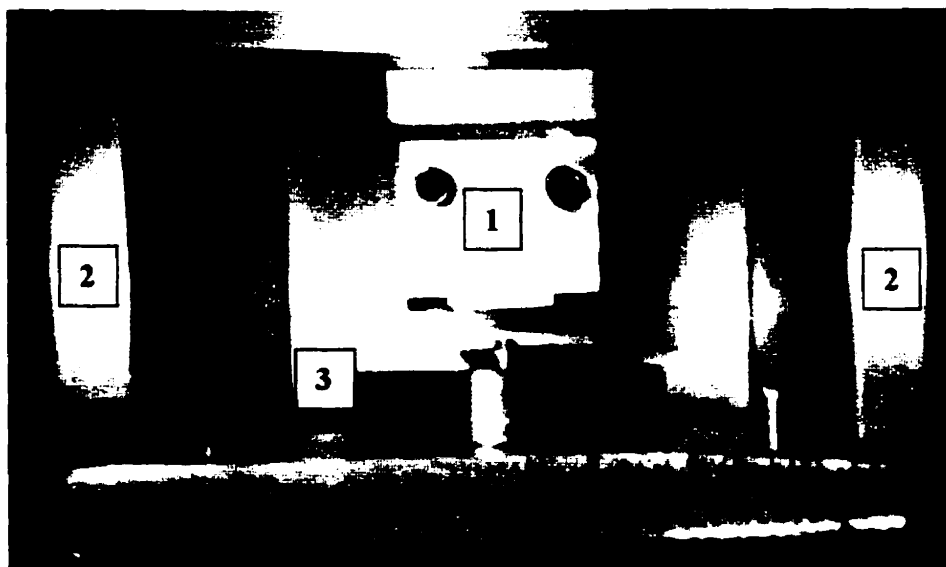
La lame doit être maintenue sur une structure assez stable afin de minimiser les vibrations. Le support de celle-ci doit être conçu de façon à ce que la lame soit parfaitement parallèle au support d'échantillons. Ce dernier doit être plan et de préférence amovible afin d'installer confortablement les spécimens. Tenant compte de toutes ces recommandations, une nouvelle machine à entailles a été conçue (Figure IV.6).

Elle présente de nombreux avantages dont : un socle stable qui assure moins de vibrations; le bras tournant facilite l'avancement de la lame sans qu'on y ajoute le poids de la main; un système de vis à clic afin de s'assurer l'origine (le zéro). En outre, le système de fixation de la lame est plus pratique et il assure un meilleur parallélisme avec le support des échantillons.



**Figure IV.6 : nouvelle machine à entaille**

Malgré ces nombreux avantages, cette nouvelle machine présente une limitation majeure : le support des échantillons est conçu pour un seul type d'échantillon (éprouvettes de type ASTM D1822), or dans nos essais des tailles plus grandes (ASTM D638 type I et IV) ont été aussi utilisées. Certaines corrections sont suggérées sur la Figure IV.7, elles se situent au niveau de la direction de la lame, le socle ainsi que le support d'éprouvettes.



**Figure IV.7 : modifications suggérées sur la nouvelle machine à entaille**

- 1** : La direction de la lame doit être parallèle aux deux côtés du socle ;
- 2** : Il faut éliminer une partie du socle sur les côtés afin de faciliter la mise en place des spécimens;
- 3** : Le support doit être adéquat à toutes les formes d'échantillons.

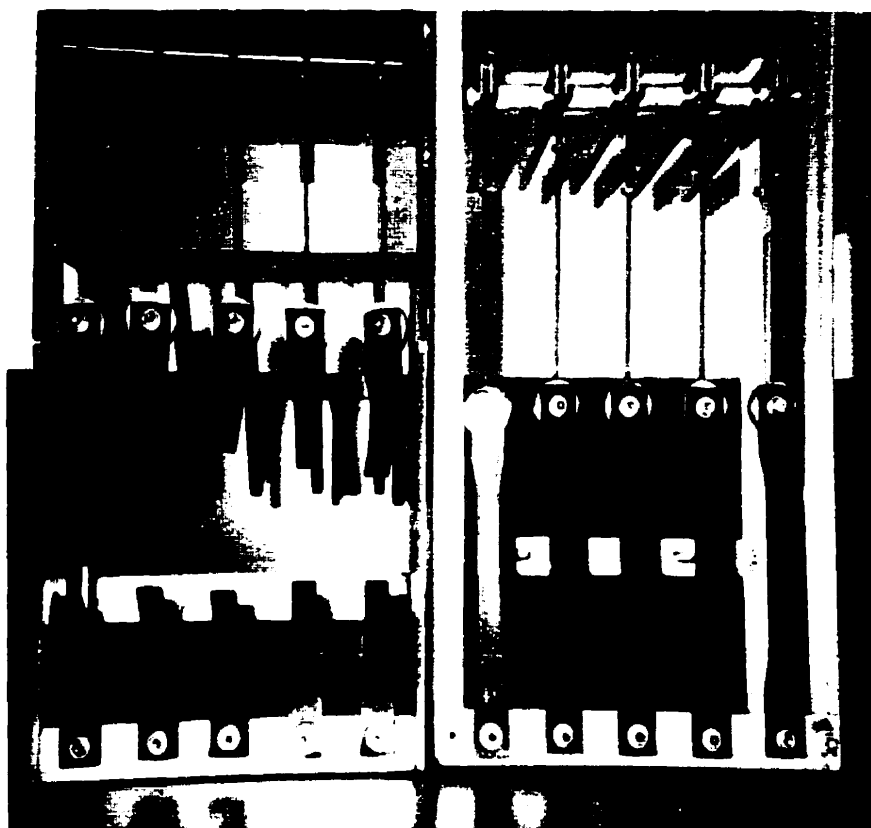
## **IV.6 Modifications faites sur le banc d'essai**

Le nouveau banc d'essai a été conçu pour qu'il s'ajuste à nos essais. Les modifications concernent surtout les dimensions des supports d'échantillons, les comptes-temps et le système de régulation du niveau d'eau.

### **IV.6.1 Les dimensions des supports**

Les nouveaux supports ont été conçus pour contenir des échantillons de grande taille tels que ceux proposés par ASTM D638 type I. Par rapport au support disponible, les modifications sont réalisées au niveau des dimensions des tiges qui maintiennent les éprouvettes. En effet, lors de la réalisation de l'essai à haute température en utilisant des éprouvettes de grande taille et le banc d'essai initial, un allongement important de ces derniers a été observé, qui a conduit une partie de chaque spécimen à être en dehors de la solution. La Figure IV.8, montre une comparaison entre le support conçu et celui déjà disponible : l'axe de rotation des bras de levier a été décalé.

Il a été conseillé d'utiliser des mâchoires pour maintenir les échantillons afin d'éviter toute concentration de contrainte suite au perçage des trous.



**Figure IV.8 : Comparaison entre les deux supports des échantillons**

#### **IV.6.2 Les comptes temps**

Les supports fabriqués ne sont pas équipés de compte temps (faute de budget), il a été suggéré que celles-ci soient placées en dehors du banc d'essai. Suite à la réalisation d'essais à haute température (supérieure à 50°C) sur le banc initial, une évaporation intense a été observée. La vapeur pénètre à l'intérieur des chronomètres placés au-dessus des supports et par suite endommage ces derniers.



On note aussi que dans le cas de la machine déjà disponible, les compteurs sont arrêtés lors de la rupture par un système d'interrupteur de compte temps (« *switch* » à mercure) qui se sont avérés inefficaces dans le cas des échantillons de grande taille où nous avons observé l'arrêt des chronos avant rupture des échantillons suite à l'allongement des échantillons dû à la charge et la température de l'essai assez élevée.

#### **IV.6.3 Le système de régulation du niveau d'eau**

Ce système est composé de deux parties : une valve solénoïde qui est activée par une sonde de niveau. Une fois que le niveau de solution atteint les tiges de la sonde, la valve se ferme.

#### **IV.7 Différence des résultats entre les deux bancs d'essai**

Les deux types de supports d'échantillons utilisés dans le cadre de notre étude présentent deux facteurs de correction différents. Ce dernier est calculé à partir des dimensions des bras de levier et des tiges, ainsi que de leurs masses respectives. Pour les mêmes conditions d'essai, la machine initiale présente un facteur de correction de 191.4 (149.1+42.3g), tandis que dans le cas des supports développés, il est de 170g. Cette différence affecte la charge appliquée.

Dans le but de vérifier les résultats des deux machines, des éprouvettes de type ASTM D638 type IV ont été testés sous les mêmes conditions. Les temps de rupture obtenus sont présentés sur le Tableau IV.1

**Tableau IV.1 temps de rupture enregistrés sur les deux bancs d'essai**

Variables	Facteur de correction (g)	Charge appliquée (g)	Temps de rupture (hr)
Banc d'essai développé	170	568.5	134.66
Banc d'essai initial	191.4	581	129.96

Les deux bancs d'essais offrent des résultats relativement semblables. Il faut noter que cette variation n'est pas due seulement à la variation de charge, mais aussi aux paramètres du banc d'essai ainsi que la méthodologie adoptée par l'opérateur.

#### **IV.8 Calcul de pourcentage d'erreur sur la charge appliquée**

La contrainte appliquée dépend du pourcentage de la contrainte à la limite élastique. celle-ci dépend de la température de l'essai et des propriétés du matériau. L'actuelle limitation des essais de résistance à la fissuration sous contrainte est qu'ils sont incapables d'isoler les propriétés de la contrainte au seuil d'écoulement comme étant un paramètre indépendant des propriétés mécaniques du polymère

Les marges d'erreurs suivantes ont été estimées :

- La contrainte à la limite élastique ( $\sigma$ ) : 1%
- L'épaisseur de l'éprouvette (W): 0.05 mm
- La largeur de la partie calibrée du spécimen (T): 0.025 mm
- Le facteur de correction du bras de levier (FC) : 10 g

Une marge d'erreur de 5% sur la charge appliquée est calculée. Ce qui a tout de même un effet important sur les résultats de l'essai.

#### **IV. 9 Les recommandations concernant le banc d'essai**

Faute de budget, certaines parties du banc d'essai ont été délaissées tels que le placement de compte-temps sur les supports des échantillons et un dispositif de contrôle et de limite de l'évaporation. La mesure du temps de rupture se mesure au moyen d'un chronomètre et le temps de rupture présente une erreur de 0 à 12 heures.

##### **IV.9.1 Contrôle et limite de l'évaporation**

Plusieurs alternatives sont proposées afin de contrôler, limiter et recycler la vapeur dégagée, ce qui permet à la fois une stabilisation de la température de l'essai et surtout une économie d'eau d'alimentation.

**1<sup>ère</sup> alternative** (plus économique et facile à réaliser) : installer un couvercle au-dessous des supports. Le couvercle en acier inoxydable s'est avéré inefficace, bien qu'il ait permis de stabiliser la température, mais ne permet pas de récupérer la vapeur d'eau.

**2<sup>ème</sup> alternative** : Placer un système de circulation d'eau froide au-dessus du bassin, qui permet de condenser l'eau et ainsi la récupérer : cette technique a été rejetée car elle ne permet pas de stabiliser la température. La non-stabilisation de la température de la solution est due au fait que l'enceinte n'est pas saturée en vapeur, le système de condensation intensifie l'évaporation afin de saturer l'enceinte (dans ce cas, l'élément chauffant fonctionne en permanence, qui risque de l'endommager à long terme vue la durée assez longue de l'essai).

**3ème alternative** : (la plus efficace, mais assez coûteuse), elle consiste à couvrir tout le système dans une enceinte fermée, tout en contrôlant la pression à l'intérieur de la cellule. Dans ce cas la température sera toujours stable car le milieu est saturé en vapeur. Alors il n'est plus nécessaire d'avoir une alimentation du bain puisque la vapeur d'eau est récupérée. Les comptes temps seront placés en dehors de l'enceinte fermée, non plus sur les supports.

## **CHAPITRE V**

### **ESSAI DE FISSURATION SOUS CONTRAINTE**

#### **V.1 Méthodologie des essais de fissuration sous contrainte**

L'objectif principal des mesures de la résistance à la fissuration sous contrainte est de déterminer l'effet des environnements chimiques sur les géomembranes en PEHD soumises à la charge des déchets. L'essai consiste à soumettre une éprouvette à une force de tension constante, correspondant à une contrainte inférieure à la contrainte de tension au seuil d'écoulement (limite d'élasticité), et les immerger simultanément dans un environnement prescrit à la température d'essai choisie.

Le déroulement des essais suit les opérations suivantes :

- 1- Mesure de la contrainte à la limite élastique;
- 2- Préparation des spécimens;
- 3- Préparation de la solution d'incubation;
- 4- Préparation des entailles;
- 5- Préparation des charges;
- 6- Montage de l'essai.

##### **V.1.1 Matériaux utilisés**

La géomembrane utilisée a été produite en 1998, par la société GSE (Canada). C'est une géomembrane en polyéthylène haute densité produite par extrusion, elle est désignée spécifiquement pour les applications de géomembrane flexible. Cette GSE HD contient approximativement 97.5% de polyéthylène de moyenne densité et 2.5% de noir de carbone ainsi que des quantités minimales d'antioxydants et de stabilisateurs.

Cette géomembrane a été utilisée par Sarazin (1998), afin de réaliser différentes soudures tout en variant les paramètres de soudage (Vitesse, Température et Pression). Le rouleau de géomembrane a été stocké dans l'entrepôt de Sageos, à l'abri de la lumière, notant qu'il était aucunement exposé à l'environnement. Les propriétés de cette géomembrane sont présentées sur le Tableau V.1.

**Tableau V.1 : Caractéristiques mécaniques et physiques de la géomembrane GSE**

Propriétés	Méthode d'essai	GSE HD
Épaisseur (mm)	ASTM D 5199	1.5
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 1505	0.94
Indice de fluidité (g/10 min.)	ASTM D 1238 (T :190°C et m : 2.16 kg)	≤ 1.0
Stabilité dimensionnelle (%)	ASTM D 1204, 100°C, 1hr.	± 2
Contrainte à la limite élastique (Psi) (sens machine)	ASTM D 638, type IV	2850
Résistance à la fissuration sous contrainte (hr)	ASTM D 1693 ASTM D 5397	1500 Supérieur à 200
Température de fusion par DSC (°C)	ASTM D 3417	125.9
Temps d'induction à l'oxydation : OIT (min)	ASTM D 3895	109
Temps d'induction à l'oxydation à haute pression : HPOIT (min)	ASTM D 5885	513

### V.1.2 Éprouvettes : forme et dimensions

Pour cette étude, trois dimensions différentes d'éprouvettes ont été utilisées. Les spécimens sont préparés au moyen de découpes normalisées ASTM présentées sur les Figure V.1 et V.2. Les dimensions des découpes utilisées sont illustrées au Tableau V.2.

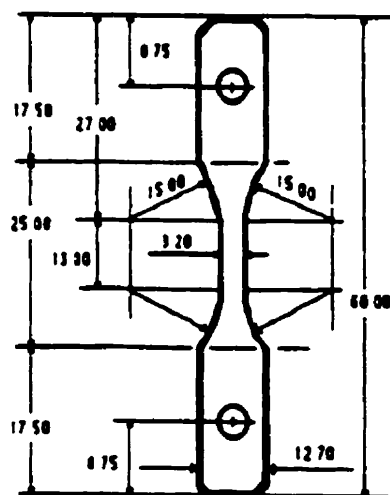


Figure V.1 : Découpe ASTM D1822 (d'après ASMT D1822)

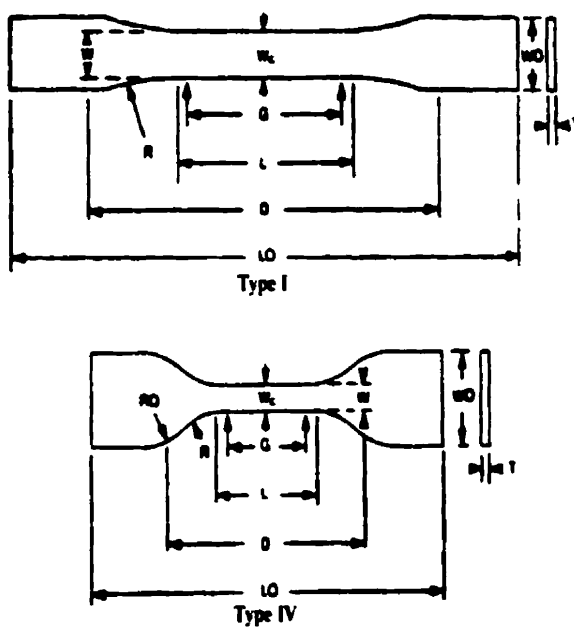


Figure V.2: Découpes ASTM D638 type I et IV (d'après ASTM D638)

**Tableau V.2: Dimensions des découpes (d'après ASTM D638 et D1822)**

<b>Dimensions (mm)</b>	<b>D638 type I</b>	<b>D638 type IV</b>	<b>D 1822</b>
LO- Longueur totale	165	115	60
WO- Largeur des extrémités	19	19	12.7
L- Longueur de la partie calibrée	57	33	13
W- Largeur de la partie calibrée	13	6	3.2
G- Distance entre marques de référence	50	25	**
R- Rayon minimal	76	14	15
D- Distance initiale entre mors	115	65	25

Les découpes ASTM D1822 et ASTM D638 type IV sont respectivement utilisées dans l'essai standard de fissuration sous contrainte ASTM D5397 et l'essai de traction à vitesse constante ASTM D638. La forme de l'échantillon ASTM D638 type I a été choisie par BAM pour tester la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures. Ces formes ont été choisies dans le but d'évaluer les temps de rupture en fonction de la largeur de la partie calibrée et pouvoir tester les soudures doubles par fusion.

### **V.1.3 Le surfactant**

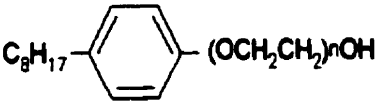
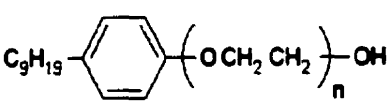
Le surfactant est utilisé dans nos essais comme agent tensio-actif afin d'accélérer le phénomène de croissance lente des fissures. Les deux types de surfactant utilisés appartiennent à la famille chimique des alkyle phénol éthoxylate, et varient suivant la nature du groupe alkyle et le nombre d'éthoxyles présents dans la chaîne principale.



Ces surfactants sont mis en solution aqueuse, à la température de l'essai. Le surfactant décrit selon ASTM D5397 est l'Igepal CO-630, utilisé à 50°C, il s'agit d'un composé qui devient immiscible avec l'eau à des températures comprises entre 52-56°C. C'est pourquoi il n'est pas utilisé pour des températures supérieures à 50°C. Pour les essais à haute température, l'Igepal CA-720 est généralement utilisé. Il a été déjà choisi par Thomas et Siebken (1997) à 5% pour les essais à 80°C. Il présente une température d'immiscibilité avec l'eau comprise entre 86-90°C.

Le Tableau V.3 présente une comparaison entre ces deux types de surfactants utilisés dans notre recherche.

**Tableau V.3 : Comparaison entre les deux types de surfactants utilisés  
(ALDRICH 2001)**

Paramètres	Igepal CA-720	Igepal CO-630
Synonyme	Polyoxyethylene(12)isooctyl-phenyl ether	Polyoxyethylene(9)nonylphenyl ether
Formule moléculaire	$4-(C_8H_{17})C_6H_4(OCH_2CH_2)_nOH, n \sim 12$	$4-(C_8H_{17})C_6H_4(OCH_2CH_2)_nOH, n \sim 9$
Structure	 <p style="text-align: center;"><math>n \sim 12</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>n \sim 9</math></p>
Point d'ébullition (°C)	> 200	> 200
Point de turbidité (°C)	86 – 90	52-56 (53.5)
Viscosité (cps)	14 – 16 à 100°C 70 – 76 à 50°C	12 -14 à 100°C 190 - 300 à 50°C

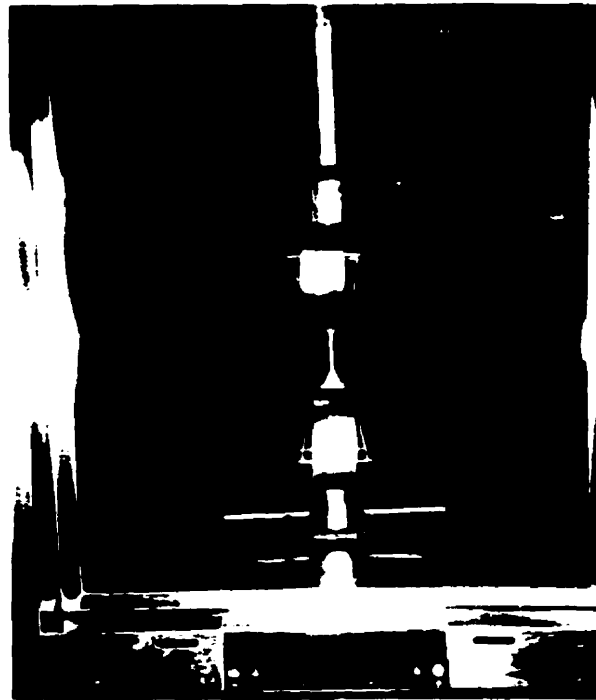
#### **V.1.4 Effet de la température sur le comportement de la contrainte à la limite élastique**

Les propriétés de la contrainte à la limite élastique des géomembranes sont évaluées par le test standardisé ASTM D638. Ces résultats sont nécessaires tant que l'essai de fissuration sous contrainte constante est réalisé suivant la contrainte à la limite d'élasticité. Celle-ci varie avec la température et doit être évaluée en conséquence. Il est à rappeler que l'éprouvette (ASTM D638 type IV) utilisée dans cet essai est différente de celle pour l'essai normalisé ASTM D5397 (ASTM D1822).

De nombreuses publications ont traité l'effet de la température sur la contrainte à la limite élastique. Tsuboi et al. (1998), Hsuan (1998), Thomas et Siebken (1997), Wright (1996), Lucas et al. (1995), Thomas et Deschepper (1993), Owen et al. (1978), ont trouvé une relation linéaire entre la contrainte à la limite élastique et la température. La contrainte à la limite d'élasticité décroît linéairement pour une augmentation de la température de l'essai.

##### **V.1.4.1 Section expérimentale**

L'essai de traction à vitesse de déformation constante a été réalisé dans une chambre à température contrôlée avec convection. Il consiste à soumettre l'échantillon à un taux d'extension contrôlé de 50 mm au moyen d'un dynamomètre INSTRON 5586 (Figure V.3).



**Figure V.3 : Essai de traction standardisé dans une chambre environnementale**

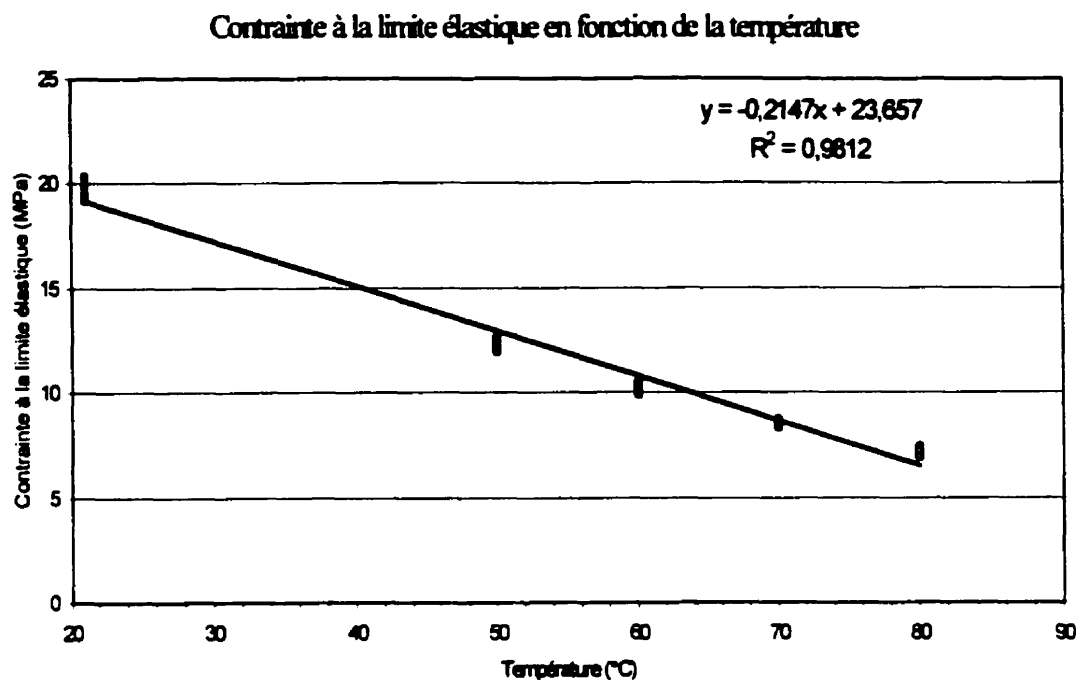
La chambre environnementale avec circulation d'air est portée à la température de l'essai (21, 50, 60, 70, et 80°C), puis l'échantillon est placé entre les mâchoires, après 15 minutes de conditionnement à la température de l'essai, on réalise l'essai de traction. Le temps de conditionnement était choisi suite à la réalisation d'essai préliminaires, il s'agit du temps à partir duquel le temps de conditionnement n'influe plus sur les résultats des essais.

#### V.1.4.2 Résultats des essais

Les résultats de l'essai confirment les études précédentes sur l'effet de la température sur le comportement de la contrainte à la limite élastique. En effet, on a obtenu une régression linéaire de la forme  $Y = - 0.2147x + 23.657$  : la pente de cette droite est de 0.21 MPa/°C (Figure V.4) . Le Tableau V.4 résume l'effet de la température sur la contrainte à la limite élastique.

**Tableau V.4 : Effet de la température sur la contrainte à la limite élastique**

Température (°C)	Contrainte à la limite élastique (MPa)
21	19.65
<u>50</u>	<u>12.37</u>
60	10.22
<u>70</u>	<u>8.46</u>
80	7.27



**Figure V.4 : Courbe de tendance de la contrainte à la limite élastique en fonction de la température**

### **V.1.5 Les paramètres de l'essai**

#### **V.1.5.1 La Température**

L'ASTM D5397, recommande une température de 50°C pour l'essai de fissuration sous contrainte à charge constante, parce qu'il s'agit de la température extrême, atteinte au niveau d'une géomembrane en contact avec les déchets et le lixiviat (ISO 6252, ASTM D5397).

La valeur de 70°C a été proposée par la littérature (Hsuan 1998, Maisonneuve et al., 1998, ISO 6252-92, Thomas et Siebken 1997). Ils ont suggéré une augmentation de la température afin d'accélérer l'essai de fissuration sous contrainte. Ils ont conclu que le temps de rupture décroît exponentiellement avec la température (Équation 3).

$$T_f = A \cdot \exp(E/RT) \quad (3)$$

Avec :

$T_f$  : Temps de rupture

A : Constante

E : Énergie d'activation (73.5 KJ/mol)

R : Constante des gaz (8.31 J/mol.K)

T : Température (K)

Hsuan (1998) mentionne que la température maximale qui offre une accélération du test est de 70 °C. Au delà de cette température, l'essai n'est plus accéléré. Il a été démontré qu'à 70°C, le temps de rupture est 4.7 fois plus faible qu'à 50°C. Lustiger (1996) admet que le taux de croissance de fissuration du polyéthylène double pour une augmentation de 7°C.

#### **V.1.5.2 La contrainte appliquée à 50°C**

Pour la température d'incubation de 50°C, la norme ASTM D5397 Appendix recommande une charge égale à 30% de la contrainte à la limite élastique à température ambiante. Dans notre cas, la charge de 30% de la contrainte à la limite élastique équivaut à 19,65 MPa, et correspond à la charge de 47% de la contrainte à la limite élastique à 50°C.

D'après ASTM D5397 cité par Hsuan et Koerner (1995), 30% de la contrainte à la limite élastique a été sélectionné pour s'assurer de se situer dans la région fragile de la courbe contrainte à la limite élastique en fonction du temps de rupture (cf. paragraphe II.5.5.1).

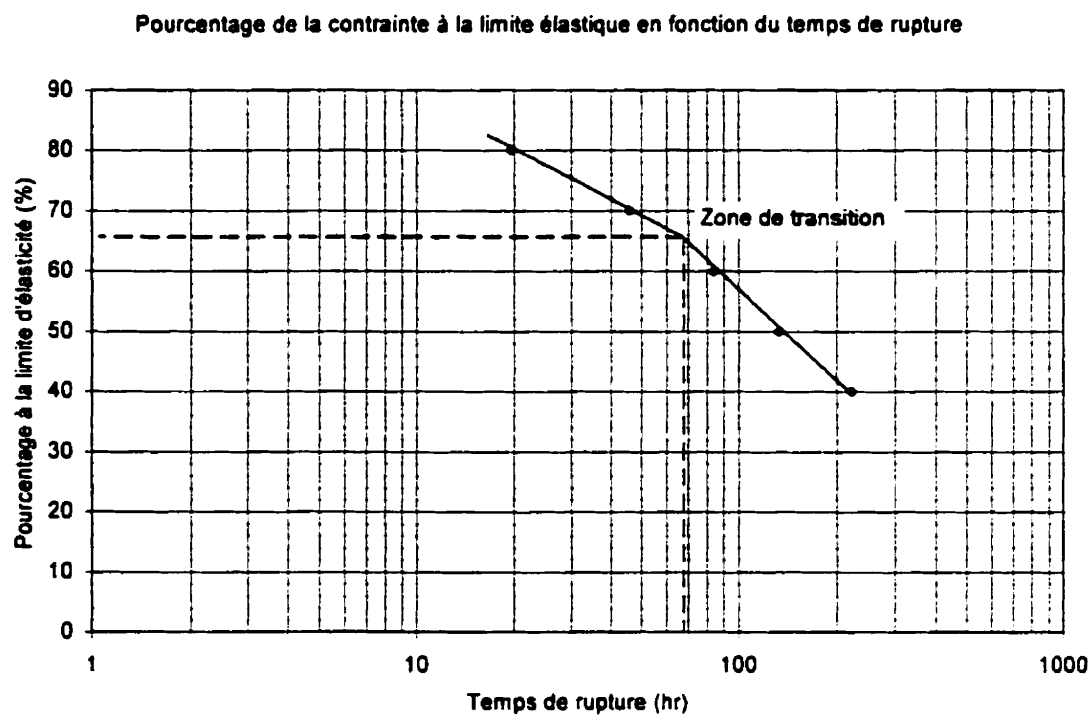
### **V.1.5.3 La contrainte appliquée à 70°C**

- **Pourcentage du yield à 70°C en fonction du temps de rupture :**

L'objectif de cet essai est de trouver la contrainte susceptible de rompre fragilement et rapidement un spécimen placé sous une contrainte constante à 70°C. Les conditions de cet essai sont tels que :

- Agent tensio-actif : Igepal CA-720;
- Profondeur d'entaille : 20% de l'épaisseur totale;
- Les pourcentages de la limite élastique à 70°C : 20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80%;
- La contrainte à la limite élastique : 8.46 MPa à 70°C;
- Taille de l'éprouvette : ASTM D1822.

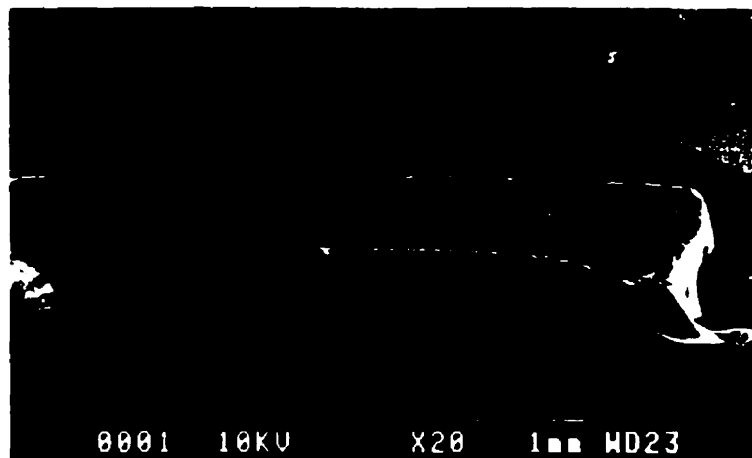
La Figure V.5 présente la courbe ductile fragile de la géomembrane utilisée dans la réalisation des soudures. Pour des contraintes élevées, la pente est relativement raide. Dans cette région, les spécimens exhibent une rupture ductile. Pour les faibles contraintes, la pente de la courbe devient plus raide, les échantillons se rompent fragilement. Ces deux comportements sont séparés par une zone de transition en forme de «*Knee*» (genou). Cette zone correspond à 65% de la contrainte à la limite élastique et à un temps de rupture de l'ordre de 70 heures. La morphologie de rupture est semblable à celle obtenue dans le cas de l'essai ASTM D5397. Différents faciès de rupture sont illustrés sur les Figures V.6a et V.6b.



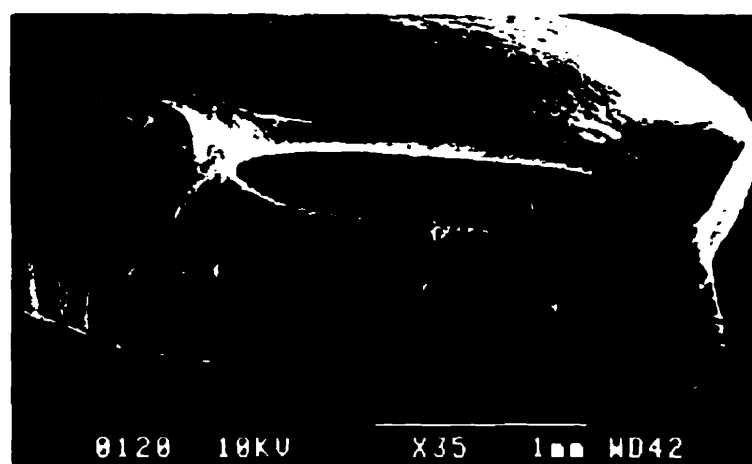
**Figure V.5 : Courbe ductile fragile de la géomembrane utilisée pour réaliser des soudures à 70°C**



a)

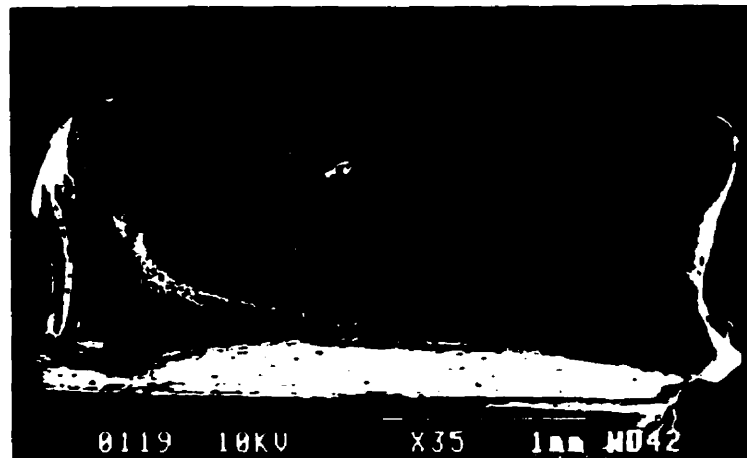


b)

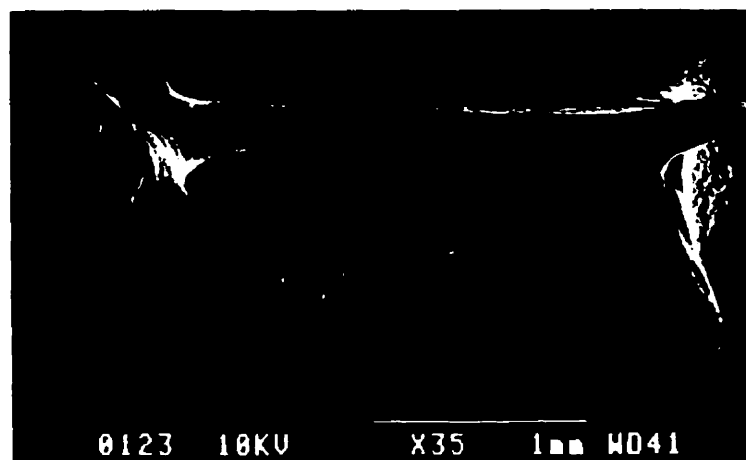


**Figure V.6a : Faciès de rupture semblable au niveau de la section transversale d'une éprouvette ASTM D 638 type IV (a) et d'une éprouvette ASTM D1822 (b) à 50°C**

a)



b)



**Figure V.6b :** Morphologie de rupture au niveau de la section transversale d'une éprouvette ASTM D638 type IV à 50°C (a) sous une charge constante de 30% de la contrainte à la limite élastique et à 70°C (b) sous une contrainte constante de 5 MPa.

Le niveau de contrainte le plus élevé qui peut assurer une rupture fragile en un minimum de temps se situe à 60% de la contrainte à la limite élastique à 70°C. Ce dernier sera retenu pour la suite de nos essais à haute température.

En fait, on n'obtient jamais une rupture totalement fragile. De manière générale, la terminologie pour décrire les faciès de rupture est variable suivant les auteurs qui de plus, n'ont pas tous la même définition pour la ductilité et la fragilité.

- **La contrainte appliquée**

Suite aux observations par SEM et aux analyses de la courbe du pourcentage de la contrainte à la limite élastique en fonction du temps de rupture, la charge constante de 25% de la contrainte à la limite élastique à 21°C a été choisie.

Celle-ci est de 5 MPa (725 psi), et correspond à 60% de la contrainte à la limite élastique à 70°C a été sélectionnée car elle est assez élevée pour produire une accélération significative de la fissuration, tout en s'assurant d'une rupture en partie fragile du spécimen.

## **V.2 Essais sans entaille sur feuille et soudure de géomembrane PEHD**

### **V.2.1 Mode opératoire**

L'essai consiste à tester la résistance à la fissuration sous contrainte d'une géomembrane vierge et d'une mauvaise soudure en se basant sur l'essai BAM. C'est un essai qui ne demande pas d'entaille, il est réalisé à une température de 80°C et à une contrainte constante de 4 MPa dans une solution active composée de 5% d'Igepal CA-720 et 95% d'eau distillée.

La soudure choisie a été jugée mauvaise par Sarazin (1998). Celle-ci présente les paramètres de soudage suivants : une force de 445 N, une vitesse de 4 m/min (13.5 pi/min) et une température de 500°C. Nous avons découpé cinq spécimens de soudures au moyen de l'emporte-pièce ASTM D638 type I, et maintenus en cisaillement sur le support, et cinq autres au moyen de la découpe ASTM D638 type IV. Les échantillons de géomembrane vierge ont été découpés au moyen de la découpe ASTM D638 type I, dans les deux sens machine et travers (5 de chaque).

### **V.2.2 Résultats des essais**

Après 500 heures de temps d'essai, aucun des échantillons n'était brisé. Le Tableau V.5 présente l'allongement observé après 500 heures d'essai. Nous avons remarqué aussi un léger rétrécissement au niveau de la partie étroite.

**Tableau V.5 : Pourcentage d'allongement après 500 heures**

<b>Spécimens testés</b>	<b>Allongement (%) après 500 heures</b>
Échantillon membrane vierge (sens machine)	4.25
Échantillon membrane vierge (sens travers)	3.75
Soudure (ASTM D638 type I)	2.75
Soudure (ASTM D638 type IV)	1.5

Thomas (1998) a mentionné que la moitié des soudures par fusion testées ont dépassé les 300 heures. Toutefois, dans le cas des soudures effectuées par Sarazin (1998), aucune soudure n'a lâché avant les 500 heures, même celles jugées de qualité médiocre. Ceci nous amène à nous interroger sur la qualité des soudures testées par Thomas. Cet essai ne semble donc pas valable pour tester les soudures réalisées en laboratoire.

### **V.3 Essais avec entaille sur des feuilles de géomembranes vierges à 50 et 70°C**

Le but de cette série d'essais est de déterminer les conditions susceptibles d'accélérer la fissuration sous contrainte des membranes vierges afin de pouvoir les appliquer sur les soudures tout en veillant à ce que les résultats restent cohérents. Pour cela, il est possible d'augmenter à la fois la profondeur de l'entaille et la température.

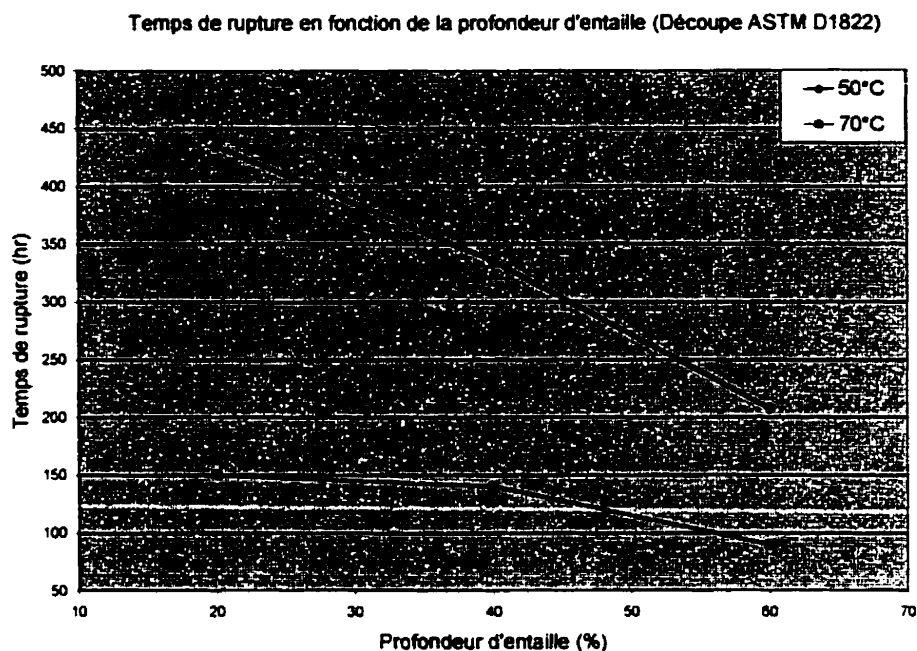
La norme ASTM D5397 recommande une taille d'éprouvette de type ASTM D1822. Or cette dernière n'est pas appropriée pour tester les soudures en raison de sa longueur trop petite comparée à la largeur de la soudure double. De plus, elle préconise une température d'essai de 50°C, mais comme déjà mentionné ci-dessus, l'augmentation de température réduirait le temps de rupture. Une température de 70°C a été choisie pour nos essais et non à 80°C comme pour l'essai BAM.

En effet, le circulateur d'immersion disponible ne permet pas de stabiliser la température à 80°C, du fait de l'absence d'un système adéquat pour contrôler l'évaporation. D'autre part, nous avons réalisé différentes profondeurs d'entailles toutes supérieures à celle déjà prescrite par la norme standard.

Durant notre étude sur la résistance à la fissuration sous contrainte des feuilles, les paramètres suivants seront pris en compte:

- La taille de l'échantillon : ASTM D1822, ASTM D638 type IV et ASTM D638 type I
- La température du test : 50 – 70°C
- Type de solution active : 10% pour l'Igepal CO630 (suggérée par ASTM), ou 5% pour l'Igepal CA-720 (les travaux précédents à haute température ont utilisé ces concentrations)
- Profondeur de l'entaille : 20, 40 et 60 % de l'épaisseur totale

En plus de cette série d'essais, un échantillon de géomembrane ayant une très faible résistance à la fissuration sous contrainte a été testé à différentes profondeurs d'entailles suivant la norme ASTM D5397. Le but de cet essai est de montrer l'effet d'une variation de profondeur sur une résine dégradée. La courbe obtenue est présentée sur la Figure V.7. Les résultats des temps de rupture confirment le choix de résine, de plus la résistance à la fissuration sous contrainte diminue pour une augmentation de profondeur d'entaille. Cette diminution est plus marquée pour une profondeur d'entaille de 60% où les temps de rupture sont plus que 3 fois inférieurs que ceux enregistrés pour 20% de profondeur.



**Figure V.7 : Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille pour une géomembrane PEHD dégradée**

### **V.3.1 Résultats des essais**

Les résultats des essais sont représentés aux Tableaux V.6a, V.6b et V.6c.

**Tableau V.6a : Les résultats des essais sur feuilles vierges à 50 et 70°C**

- **Conditions d'essai : contrainte de 30% du yield, 50°C, Igepal CO-630**

	<u>20% d'entaille</u>		<u>40% d'entaille</u>		<u>60% d'entaille</u>	
Découpe	Moyenne (hr)	CV (%)	Moyenne (hr)	CV (%)	Moyenne (hr)	CV (%)
ASTM D5397	435	5	335	7	208	15
ASTM D638 type IV	359	4	548	1	412	7
ASTM D638 type I	358	6	600	5	346	7

- **Conditions d'essai : contrainte de 5 Mpa, 70°C, Igepal CA-720**

	<u>20% d'entaille</u>		<u>40% d'entaille</u>		<u>60% d'entaille</u>	
Découpe	Moyenne (hr)	CV (%)	Moyenne (hr)	CV (%)	Moyenne (hr)	CV (%)
ASTM D5397	150	8	140	10	90	17
ASTM D638 type IV	135	5	130	9	62	5
ASTM D638 type I	150	7	102	7	82	10



**Tableau V.6b : Variation du temps de rupture en fonction de la température pour les trois différentes formes d'éprouvettes et profondeurs d'entaille**

	<b>ASTM D1822</b>			<b>ASTM D638 type IV</b>			<b>ASTM D638 type I</b>		
<b>Profondeur de l'entaille (%)</b>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>60</u>
<b>Temps de ruptures à 50°C (hr)</b>	435	335	208	359	548	412	358	600	346
<b>Temps de ruptures à 70°C (hr)</b>	150	140	90	135	130	62	150	102	82
<b>Diminution du temps de rupture en fonction de la température de l'essai (%)</b>	<u>65</u>	<u>58</u>	<u>56</u>	<u>62</u>	<u>76</u>	<u>85</u>	<u>58</u>	<u>83</u>	<u>76</u>

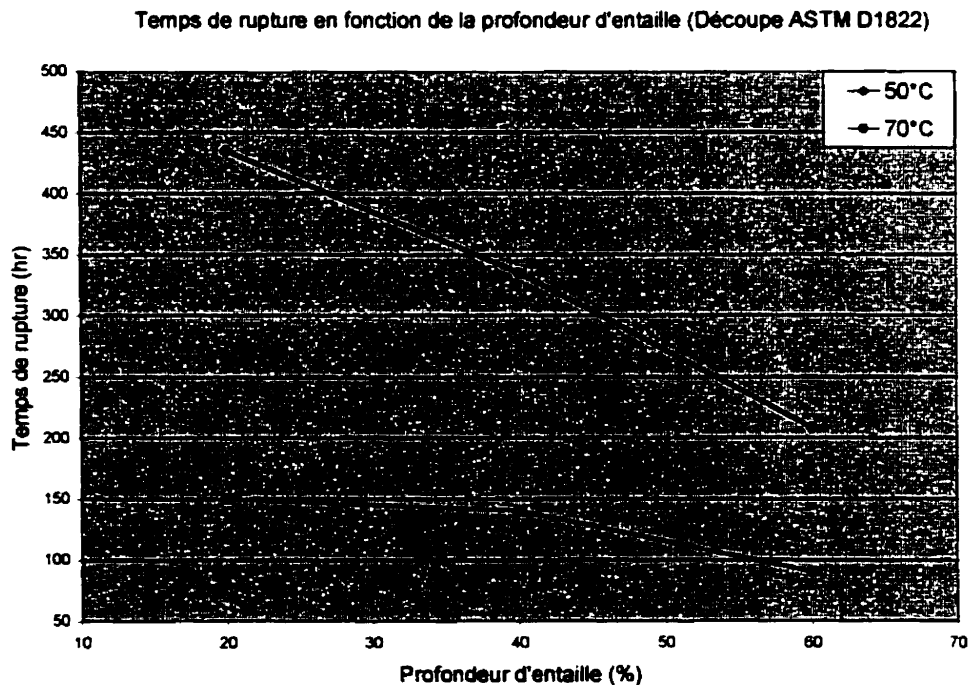
**Tableau V.6c : Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille pour les trois différentes formes d'éprouvettes à 70°C**

<b>Éprouvettes</b>	<b>Diminution du temps de rupture en fonction de la profondeur de l'entaille (%)</b>		
	<b>Entre 20-40%</b>	<b>Entre 20-60%</b>	<b>Entre 40-60%</b>
<b>ASTM D1822</b>	<u>6</u>	<u>40</u>	<u>36</u>
<b>ASTM D638 type IV</b>	<u>4</u>	<u>54</u>	<u>53</u>
<b>ASTM D638 type I</b>	<u>32</u>	<u>45</u>	<u>20</u>

### V.3.2 Analyse des résultats

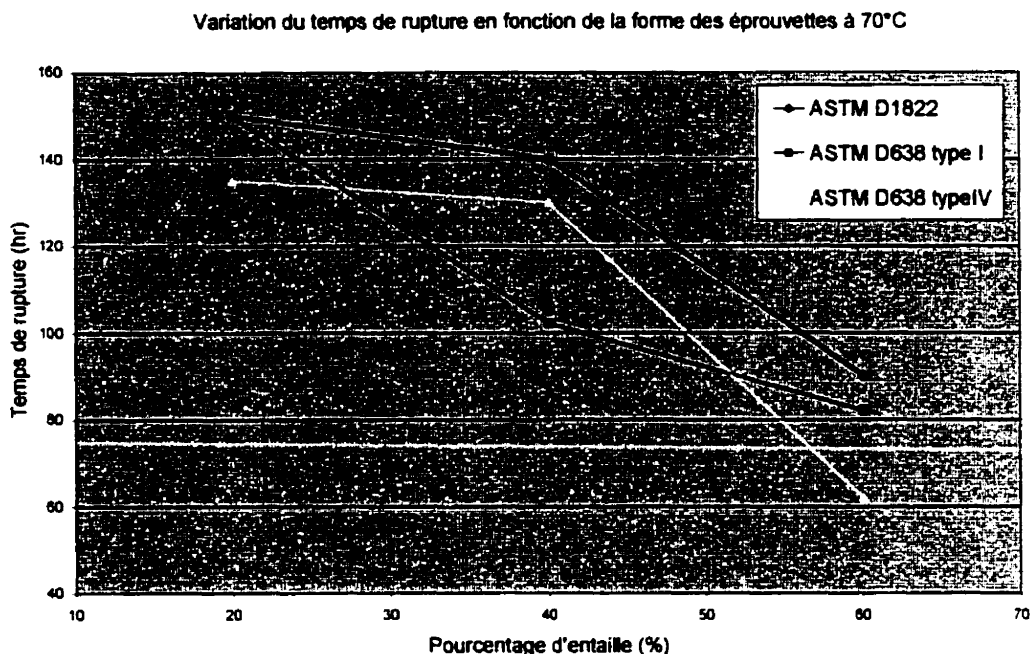
Les résultats des essais à haute température confirment les travaux de Hsuan (1998) et Thomas (1997), ces derniers ayant déjà prouvé l'effet accélérateur d'une élévation de température sur les temps de rupture. Nous observons une accélération des temps de rupture de 2 à 3 fois pour les trois types d'éprouvettes.

De même, notre recherche supporte le choix de l'ASTM sur les conditions de l'essai standard à 50°C. En effet, seuls ces échantillons obéissent à la règle suivant laquelle, le temps de rupture diminue pour une augmentation de profondeur d'entaille (Figure V.8).



**Figure V.8 : Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille à 50°C et à 70°C pour l'éprouvette ASTM D1822**

Néanmoins à 70°C, cette diminution est plus importante pour les éprouvettes de grande taille (Figure V.9). À cette température, les éprouvettes ASTM D638 type I et IV peuvent être utilisées pour accélérer l'essai.

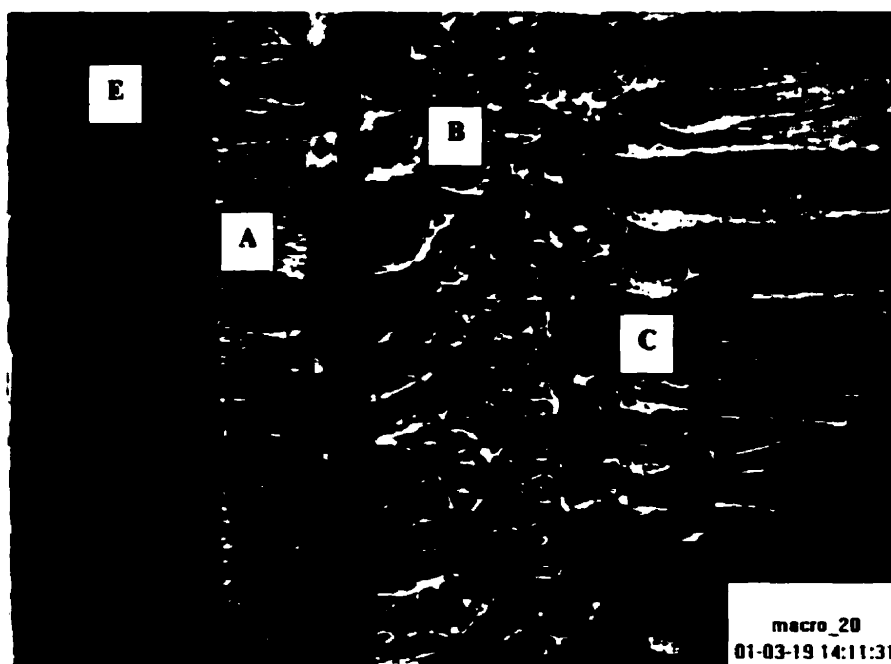


**Figure V.9 : Variation du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille à 70°C pour les trois formes d'éprouvettes.**

Contre toute attente, nous notons une meilleure résistance à la fissuration sous contrainte dans le cas des éprouvettes ASTM D638 types I et IV pour une augmentation de profondeur d'entaille de 40% à 60% à la température de 50°C. Cette augmentation pourrait s'expliquer par le fait qu'une augmentation de profondeur d'entaille et de la largeur de la partie calibrée de l'éprouvette (3.2, 6 et 13 mm) ont provoqué une fermeture de l'entaille et par suite, diminué le processus de diffusion du surfactant à l'intérieur de celle-ci. La solution active est alors moins efficace à la base de l'entaille pour les profondeurs d'entaille de 40 et 60% que pour celle de 20%. Ce résultat est directement attribuable à l'efficacité de ce surfactant particulier.

### V.3.3 Observation SEM : microscope électronique à balayage

Une micrographie de la section transversale après rupture est présentée à la Figure V.10. Elle montre au début un étirement uniforme de fibrilles (A) formées immédiatement après la mise en extension, puis un film (B) formé à la base de la craquelure après le chargement, pour finir par une structure fibreuse (C) due à la fracturation des fibrilles durant le mécanisme de croissance lente des fissures. La taille de cette dernière augmente quand la contrainte appliquée à la base de la fissure augmente suite à une réduction de la surface de la section transversale (Lu et al. 1991, Lu et al. 1999).



**Figure V.10 : Microstructure de rupture d'une géomembrane PEHD soumise à l'essai standard ASTM D5397 (E : entaille)**

#### **V.3.4 Effet d'une substitution de la solution active à 50°C**

Dans cet essai, nous avons remplacé l'agent tensio-actif standard employé à 50°C par l'Igepal CA-720 préconisé pour les essais à haute température dans l'objectif d'évaluer l'effet de ce dernier sur la vitesse de fissuration. Néanmoins, les résultats des essais réalisés sur les éprouvettes type ASTM D1822 à 60% de profondeur d'entaille sont supérieurs à 500 heures, durée à laquelle les essais sont arrêtés.

Cette augmentation du temps de rupture a été associée à la viscosité du surfactant. L'Igepal CA 720 est plus dense que celui utilisé à 50°C, il comporte plus de liaisons hydrogène et surtout, sa viscosité augmente à 50°C, les molécules du surfactant n'arrivent pas à se diffuser à l'intérieur de l'entaille. En plus, une réduction de l'énergie d'activation du processus de déformation serait à l'origine de cette augmentation des temps de rupture. En conclusion, l'Igepal CA-720 ne doit pas être utilisé à cette température.

#### **V.3.5 Effet d'une double entaille de 20% sur l'épaisseur totale**

Afin de réduire le temps de rupture, nous proposons de réaliser une entaille de 20% de profondeur sur chaque facette de la membrane. Les éprouvettes sont plongées dans deux environnements distincts, l'un à 50°C (Igepal CO-630) et l'autre à 70°C (Igepal CA-720). Pour chacune des conditions, les charges respectives de 30% de la contrainte à la limite élastique et de 5 MPa ont été appliquées.

À 50°C, les temps de rupture sur les trois types d'éprouvettes (celles d'ASTM D638 types I et IV, et celle de l'essai standard ASTM D1822) sont supérieurs à 500 heures, durée à laquelle les essais ont été arrêtés. Ce qui nous amène à conclure que la réalisation d'une double entaille ne permet pas d'accélérer l'essai. La seule différence entre ces deux essais est la charge appliquée. En effet, dans le cas de la double entaille, la charge appliquée est celle correspondant à 40% d'entaille ; elle est plus faible que celle à 20% d'entaille, ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus.

Le même essai à 70°C a été réalisé, exclusivement sur des échantillons ASTM D638 type I. Les essais ont été arrêtés après 300 heures sans avoir obtenu de rupture. Notons que deux charges distinctes ont été utilisées, la première correspondant à la charge pour une entaille de 20% et l'autre à celle de 40% de l'épaisseur totale. Il faut rappeler que pour une seule entaille les temps de rupture n'ont dépassé les 130 heures dans aucun des deux cas.

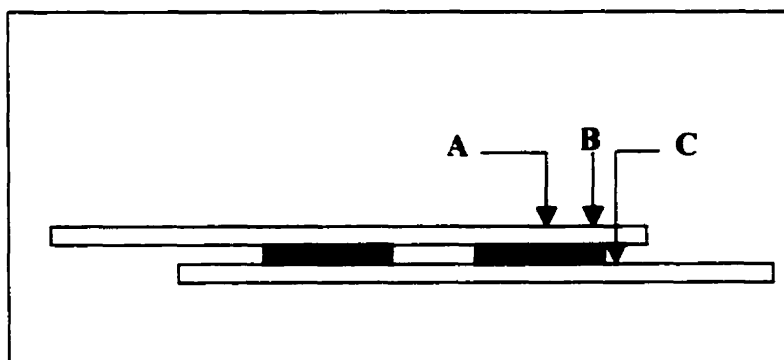
#### **V.4 Essais préliminaires sur les soudures double par fusion pour évaluer les conditions d'essai**

Cet essai a pour but de déterminer les conditions expérimentales idéales pour tester la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures. Il consiste à déterminer l'emplacement et la profondeur de l'entaille qui assurent un minimum de temps de rupture tout en restant cohérents vis-à-vis des essais de fissuration existants, c'est à dire en reproduisant un phénomène de fissuration ayant des caractéristiques semblables à celui des essais existants.

##### **V.4.1 Influence de la localisation de l'entaille**

Pour ce faire, nous avons utilisé deux types d'éprouvettes, ASTM D638 type I et IV. Il est à noter que les conditions de soudage de la soudure testée sont inconnues.

Le bain d'incubation est maintenu à une température de 70°C, l'agent tensioactif utilisé est l'Igepal CA-720, et l'échantillon est soumis à une contrainte constante de 5 MPa. Les entailles sont placées suivant les positions A (au milieu de la soudure), B (à la limite de la soudure) et C (à côté du bourrelet de soudage) comme l'indique la Figure V.11



**Figure V.11 : Les différentes positions d'entaille**

Pour des raisons pratiques, on s'est contenté de garder les conditions suivantes :

- Découpe ASTM D638 type IV : l'entaille se situe au milieu de la soudure (A) avec des profondeurs de 20, 40 et 60% de l'épaisseur totale de la soudure.
- Découpe ASTM D638 type I : pour les positions (A) et (B), seule la profondeur d'entaille de 60% est utilisée (les autres profondeurs suggèrent des charges assez élevées). Pour la condition (C), on utilise les 3 profondeurs d'entaille.

L'analyse des résultats obtenus (Tableau V.7) permet d'éliminer certaines conditions, dont la position de l'entaille à côté du bourrelet de soudage ainsi qu'au niveau des limites des traces des molettes. Ces emplacements ne permettent pas d'accélérer l'essai.

**Tableau V.7 : Résultats des essais préliminaires sur une soudure double par fusion**

	Position	Profondeur d'entaille (%)	Temps de rupture (hr)	CV (%)
<b>ASTM D638 type IV</b>	A	20	214	10
	A	40	102	7
	A	60	336	2
<b>ASTM D638 type I</b>	A	60	369	8
	B	60	437	4
	C	20, 40 et 60	Supérieur à 500 hr	***



### V.4.2 Influence de la profondeur d'entaille

La taille d'éprouvette qui sera retenue pour la suite de nos essais est celle d'ASTM D638 type IV. Sa taille est assez grande pour englober la soudure et offre les temps de rupture les plus rapides à 70°C. L'entaille est placée au milieu de la soudure (position A), qui semble être la plus facile à mettre en œuvre. Les profondeurs varient entre 20 et 60% de l'épaisseur totale de la soudure avec une incrémentation de 5 %.

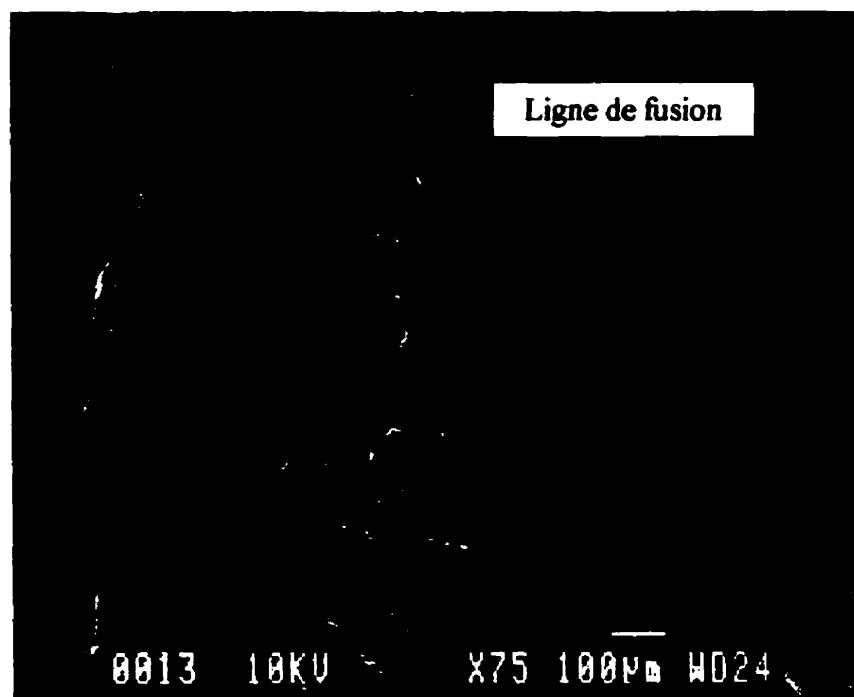
#### V.4.2.1 Résultats

Deux soudures réalisées par Sarazin (1998) ont été choisies, une jugée bonne (BBC) et une mauvaise (DCC) dont les conditions de soudage et les temps de rupture sont rapportés sur le Tableau V.8.

**Tableau V.8 : Moyennes des temps de rupture obtenues à différentes profondeurs d'entaille**

Soudures	T (°C)	P (N)	V (pi/min)	Moyennes des temps de rupture (hr) pour différentes profondeurs d'entaille					
				30%	40%	45%	50%	55%	60%
BBC	350	310	13.5	73	71	59	67	123	110
DCC	400	580	13.5	31.5	53	76	102	83	100

Les résultats des essais confirment que les conditions de soudage affectent la résistance à la fissuration sous contrainte. La soudure surchauffée et surpressée (DCC) est plus susceptible à la fissuration. La localisation de la zone de faiblesse varie d'une soudure à une autre, elle se situe de part et d'autre du plan central. Nous supposons que cette zone commence à la limite entre la partie de la feuille restée intacte et la partie qui a été fondue et ainsi modifiée au cours du soudage. Ceci pourrait se justifier par les gradients thermiques et les pressions exercées sur les feuilles qui tendent à repousser du matériel en dehors de la soudure et donc diminuer son épaisseur. De plus l'élément chauffant n'a pas la même largeur en dessous et en dessus, ce qui aurait pour effet de déplacer la zone ayant été fondue par rapport au plan central. La Figure V.12 montre la localisation de la ligne de fusion au niveau de la soudure.

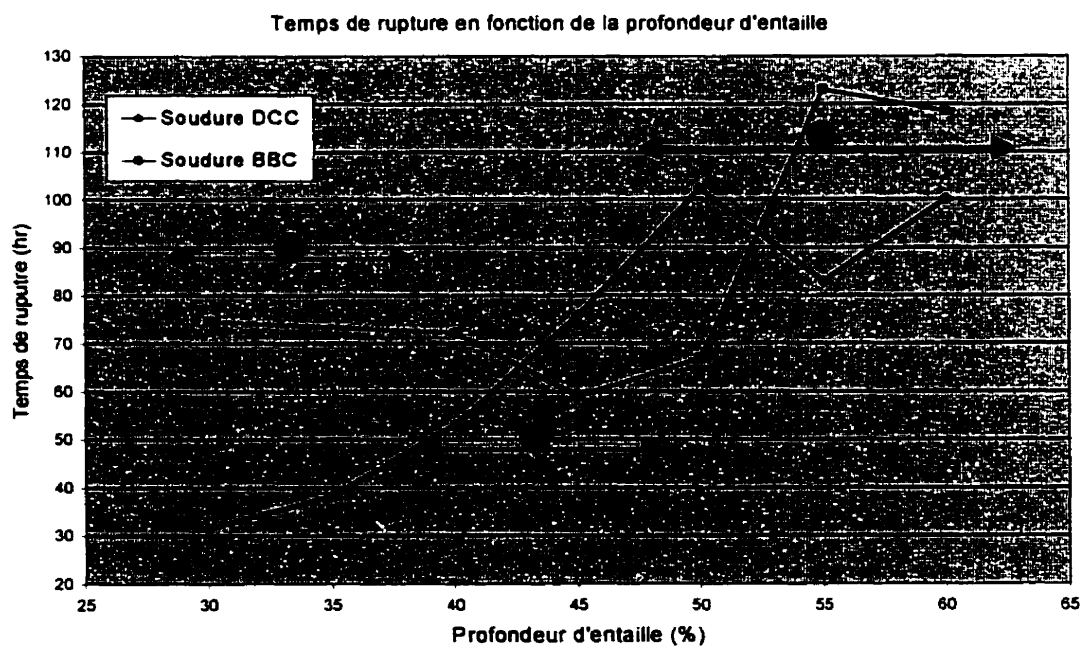


**Figure V.12 : Ligne de fusion observée au niveau de la soudure DCC**

Dans le cas de la soudure BBC, les plus faibles temps de rupture sont situés dans la plage comprise entre 30 et 45% de l'épaisseur totale de la soudure. Par contre, dans le cas de la soudure DCC (surchauffée et surpressée), la zone de faiblesse se situe aussi entre 30 et 45% et continue jusqu'à atteindre vraisemblablement la zone de faiblesse à 30% de profondeur d'entaille. Il semble que l'effet du chauffage soit propagé sur une plus grande épaisseur de la géomembrane.

L'analyse de la courbe du temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille pour deux soudures différentes (Figure V.13) montre que la variation doit obéir à une règle générale. En effet, on distingue trois zones :

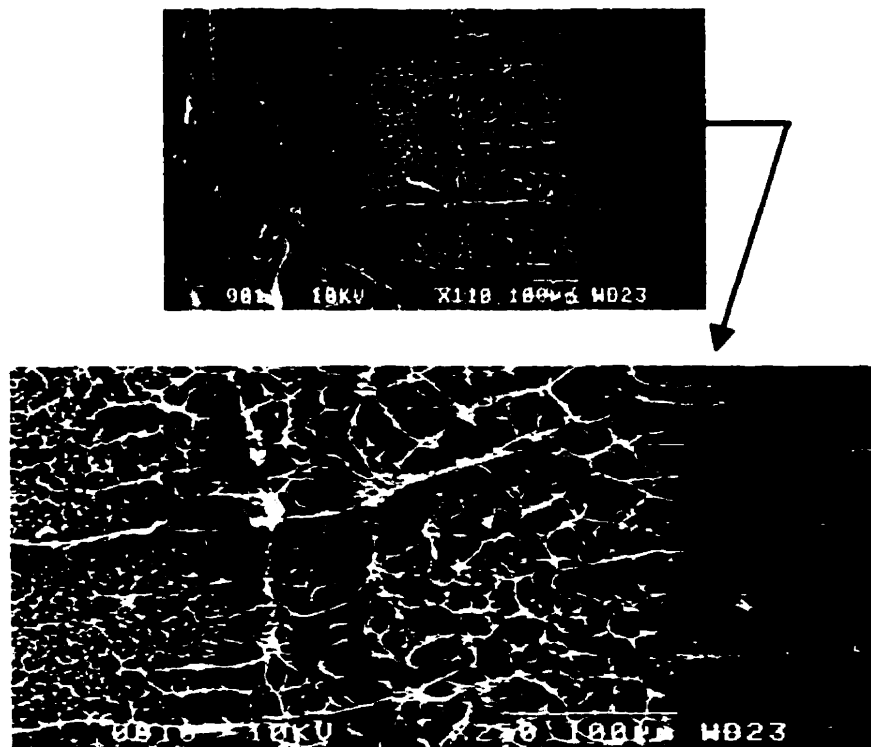
- Zone ● : le temps de rupture décroît jusqu'à atteindre la zone affectée par le soudage
- Zone ● : il s'agit de la zone la plus susceptible de se fissurer
- Zone ● : la variation du temps de rupture est typique à celle d'une feuille vierge



**Figure V.13 : Temps de rupture en fonction de la profondeur d'entaille pour les soudures DCC et BBC**

#### V.4.2.2 Morphologie de rupture au niveau d'une soudure double par fusion

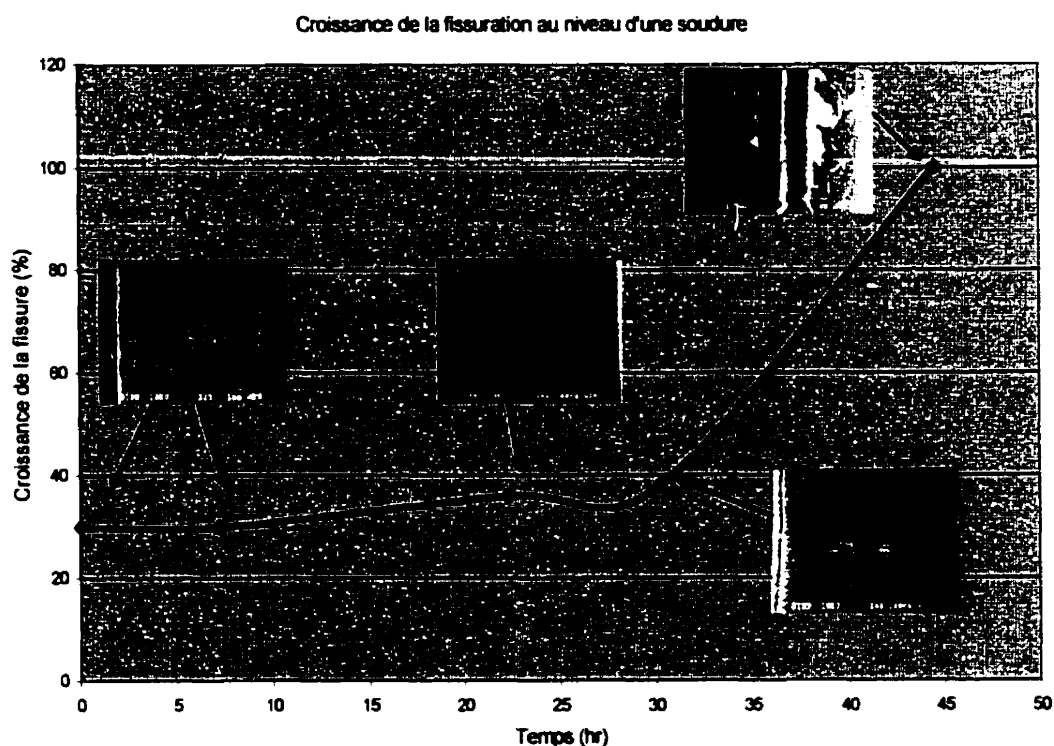
Comme il a été mentionné dans les travaux de Halse et al. (1990), la morphologie de rupture au niveau de la soudure présente 3 régions différentes (Figure V.14): la fissuration débute par une mince région ductile, ceci est dû à des contraintes élevées exercées sur la feuille. Ensuite, la microstructure change de morphologie avec une large section fibreuse (Fibrous morphology) provoquée par des contraintes modérées. Finalement, on observe une section sous forme de plume (Hackle structure) suivie d'une rupture globale par déchirement du produit quand les contraintes deviennent assez importante suite à la réduction de la section du spécimen.



**Figure V.14 : Morphologie de la surface de rupture au niveau d'une soudure double par fusion**

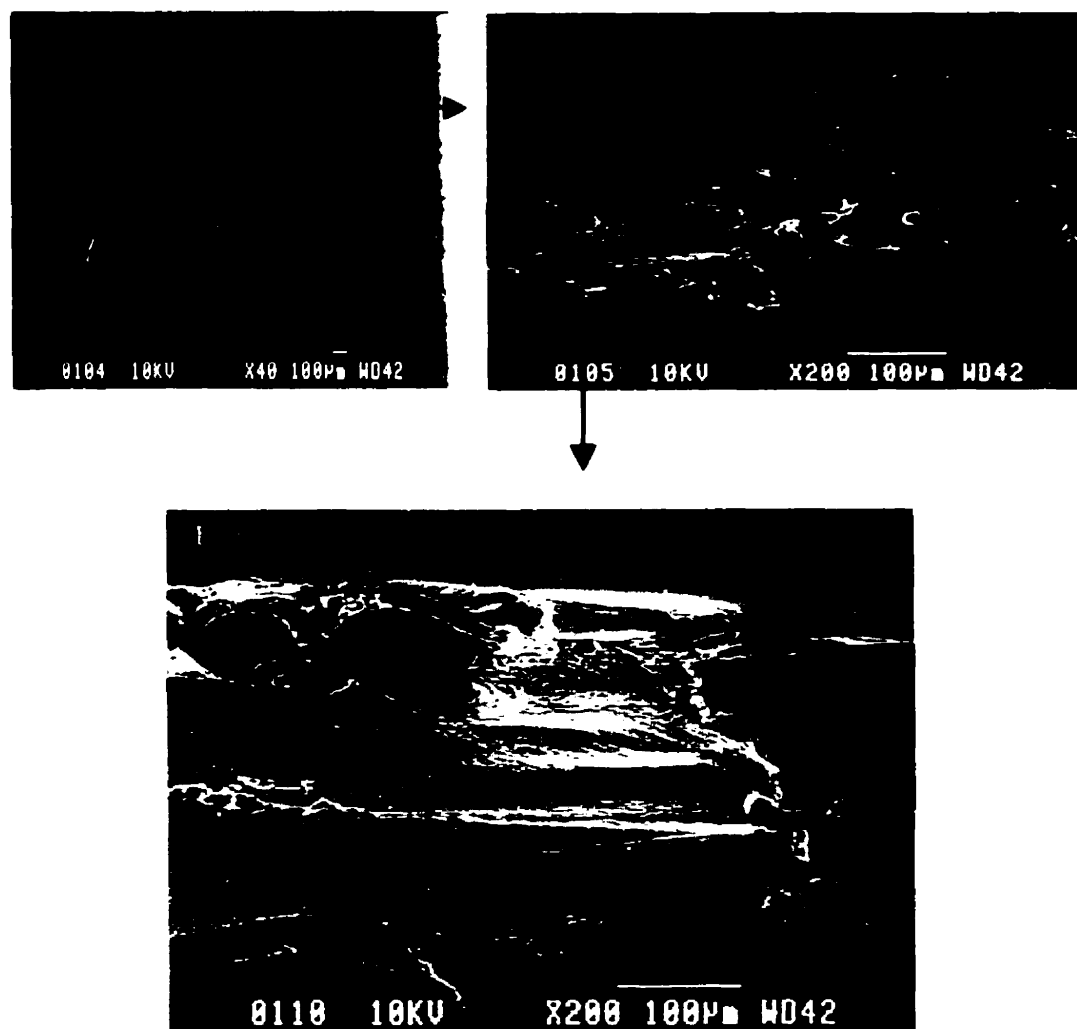
### V.4.2.3 Vitesse de croissance de la fissuration

La Figure V.15 présente l'évolution de la fissure au cours du temps au niveau de la soudure. La propagation de la fissuration est très faible jusqu'à 7 heures d'essai. Après 22 heures, la fissure a une croissance de 5%, une deuxième fissure de longueur 0.4 mm est observée dans la direction de l'entaille. Après 30 heures, plusieurs fissures sont apparues à la base de l'entaille toujours dans la direction de celle-ci. La rupture de l'échantillon est intervenue après 44 heures d'incubation.



**Figure V.15 : Croissance de la fissuration en fonction du temps au niveau de la soudure CBC**

Les micrographies de la zone endommagée au niveau de la région centrale de la soudure sont présentées à la Figure V.16.

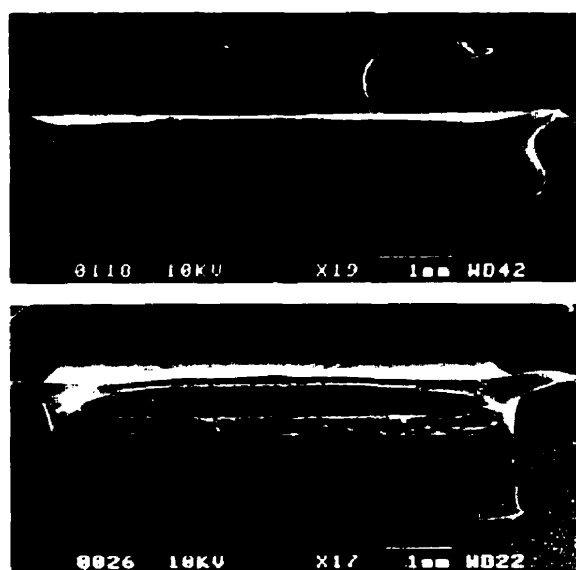


**Figure V.16 : Morphologie de la zone endommagée à la base de la soudure après 30 heures d'essai à 70°C et sous une contrainte constante de 5 MPa**

### V.4.3 Comparaison des résultats des essais sur les soudures et sur les feuilles vierges

Une augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette est supposée améliorer la résistance à la fissuration sous contrainte spécifiquement pour les matériaux ayant une limite d'élasticité assez élevée. Or dans le cas des soudures, malgré une épaisseur presque le double de celle de la feuille vierge, les temps de rupture sont nettement inférieurs, en considérant que la contrainte appliquée est la même pour les soudures et les feuilles.

Une fois dépassée la zone ayant été fondue, le comportement de la soudure redevient évidemment le même que celui d'une feuille vierge, ce qui est clairement démontré par les résultats des temps de rupture très voisins de ceux obtenus sur les feuilles. La Figure V.17 montre le même faciès de rupture au niveau d'une géomembrane à 20% de profondeur d'entaille et une soudure à 60%.



**Figure V.17 : Faciès de rupture au niveau d'une géomembrane et une soudure soumis à une contrainte constante de 5 MPa, à 70°C pour des profondeurs d'entaille respectifs de 20 et 60% de l'épaisseur totale.**

#### **V.4.4 Sélection des conditions expérimentales**

Suite aux résultats des essais, les conditions suivantes ont été adoptées :

- **La taille des spécimens :**

La découpe ASTM D638 type IV semble être adéquate pour ce type d'essai, car elle est suffisamment longue pour englober toute la soudure. La charge appliquée est raisonnable par rapport à celle nécessaire pour les éprouvettes ASTM D638 type I (la charge appliquée augmente en parallèle avec la largeur de la partie étroite de l'éprouvette). La forme d'éprouvette choisie offre des résultats reproductibles.

- **Position et profondeur de l'entaille :**

L'entaille est réalisée au milieu de la soudure. Non seulement, celle-ci est facile à réaliser, mais encore le pourcentage d'erreur sera minimal.

Au vu des résultats des essais (cf. paragraphe V.4.2.1), la profondeur d'entaille choisie pour nos essais est de 30% de l'épaisseur totale. Ce choix se justifie par les arguments suivants:

- La rupture est assez rapide;
- La répétitivité et reproductibilité des temps de rupture;
- La charge appliquée est acceptable et offre une rupture du spécimen semblable à celle obtenue par l'essai normalisé ASTM;
- Il permet de bien distinguer entre les conditions de soudage;
- Il est à peu près assuré de se trouver avant la zone ayant été fondue .



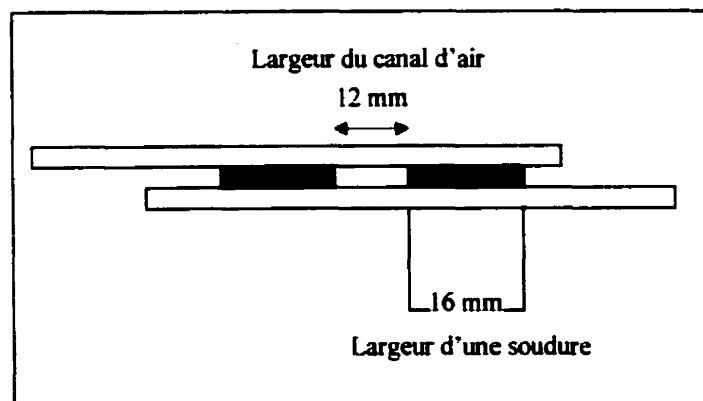
## V.5 Essais sur les soudures de Sarazin (1998)

### V.5.1 Rappel des travaux précédents

Notre travail de recherche s'inscrit dans la continuité de l'étude réalisée par Sarazin (1998) sur le comportement des soudures par fusion des géomembranes PEHD. En effet, ce dernier a réalisé une série d'essais afin d'évaluer l'effet des paramètres de soudage sur la qualité des soudures de géomembrane en PEHD.

#### V.5.1.1 Programme expérimental

La machine de soudage utilisée par Sarazin (1998), est la version améliorée de celle décrite par Struve (1993). Il s'agit d'une soudeuse avec élément chauffant, qui consiste à faire passer entre les feuilles une pièce de métal chauffée électriquement. Cette technique de soudage par fusion fournit des soudures doubles, séparées par un canal comme le présente la Figure V.18.



**Figure V.18 : Dimensions de la soudure double**

Sarazin a effectué 64 soudures tout en variant les trois principaux paramètres de soudage suivants :

- La température de soudage : entre 300 et 500°C avec une incrémentation de 50°C;
- La pression de soudage : 4 différentes pressions comprises entre 220 et 580 N ainsi que la pression limite de la machine (770N);
- La vitesse de soudage : 4.5, 9 et 13.5 pi/min.

Le soudage (après nettoyage et séchage des surfaces des géomembranes) a été effectué le long de la direction machine des feuilles de géomembrane (c'est à dire la direction de l'extrusion), à température ambiante contrôlée (25°C) sur le sol du laboratoire. Toutes les soudures obtenues présentent des caractéristiques communes. Ce procédé de soudage doit avoir pour effet de fondre 20 à 30 % de l'épaisseur des feuilles (Sarazin, 1998).

#### **V.5.1.2 Résultats**

Suite à la réalisation de ces soudures, une série d'inspections visuelles, de mesures des paramètres dimensionnels et surtout une évaluation de la qualité de ces soudures au moyen de l'essai de pelage ont été effectuées.

- **Inspection visuelle**

Avec cette première caractérisation, de nombreuses conditions ne sont pas recommandées pour obtenir un aspect extérieur convenable. En particulier, la plus faible vitesse (4.5 pi/min) et la plus haute température (500°C) ont donné des soudures surchauffées ou sur-pressées.

La perle de soudage (formée principalement par le polymère qui s'accumule derrière l'élément chauffant) est présente pour presque toutes les conditions, exceptée pour les plus faibles températures et forces. La forme et les dimensions de celle-ci sont différentes selon les conditions de soudage.

De nombreux joints présentent des ondulations qui sont dues à une profondeur de zone fondue trop importante.

- **L'essai de pelage**

Les conditions combinant une forte vitesse avec une faible température (et une force pas trop importante) offrent des soudures satisfaisantes. En outre l'étude a montré que, excepté deux conditions limites de soudage, tous les joints réalisés en laboratoire ont réussi l'essai de pelage.

- **Les méthodes d'analyse thermique**

L'analyse enthalpique différentielle DSC "*Differential Scanning Calorimetry*" sur des échantillons issus des essais thermiques, a montré que les différents cycles thermiques ont une influence sur la structure du polyéthylène, en particulier une augmentation du taux de cristallisation pour les températures d'essai de 400 et 450°C, tandis que le polymère de l'essai à 500°C a été totalement dégradé. Pour les échantillons des essais à 300 et 350°C, la fusion ne semble pas complète, ce qui est une conséquence de la rapidité du cycle thermique qui ne laisse pas le temps au polymère d'atteindre la température programmée.

Le Tableau V.9 présente les conditions de soudage jugées convenables, en tenant compte des résultats des essais réalisés sur les différentes soudures.

**Tableau V.9: Conditions de soudage convenables (Sarazin 1998)**

Force (N)	Vitesse (pi/min)	Température (°C)				
		300	350	400	450	500
220	4.5	<u>Oui(AAA)</u>	<u>Non(ABA)</u>	Non	Non	Non
	9	<u>Oui(AAB)</u>	<u>Oui(ABB)</u>	<u>Non(ACB)</u>	Non	Non
	13.5	<u>Oui(AAC)</u>	<u>Oui(ABC)</u>	<u>Non(ACC)</u>	Non	Non
310	4.5	<u>Oui(BAA)</u>	<u>Non(BBA)</u>	Non	Non	Non
	9	<u>Oui(BAB)</u>	<u>Oui(BBB)</u>	<u>Non(BCB)</u>	Non	Non
	13.5	<u>Oui(BAC)</u>	<u>Oui(BBC)</u>	<u>Non(BCC)</u>	Non	Non
445	4.5	<u>Non(CAA)</u>	<u>Non(CBA)</u>	Non	Non	Non
	9	<u>Oui(CAB)</u>	<u>Non(CBB)</u>	Non	Non	Non
	13.5	<u>Oui(CAC)</u>	<u>Non(CBC)</u>	Non	Non	Non
580	4.5	<u>Non(DAA)</u>	Non	Non	Non	Non
	9	Non	Non	Non	Non	Non
	13.5	Non	Non	Non	Non	Non
770	20	N-E	Non	Non	Non	Non

**Oui** : Convenable

**Non** : Pas convenable

N-E : Non effectuée

### **V.5.1.3 Conclusions**

Ces résultats sont en contradiction vis-à-vis des possibilités de la machine et de l'idée que l'on se fait d'une soudure acceptable :

- ces conditions correspondent aux plus faibles températures de soudage utilisées;
- les zones qui engendrent les meilleures soudures sont relativement limitées.

En conclusion de son étude, Sarazin confirme que l'essai de pelage a servi à partager les conditions de « bon » ou de « mauvais » soudage, en terme d'adhésion. Cependant, il n'a pas permis de différencier autrement les conditions de soudage, au regard des paramètres mesurés. Il suggère des essais plus poussés pour tester les soudures et vérifier l'influence des conditions de soudage sur les essais de stress cracking afin de pouvoir les distinguer et évaluer leurs performances à long terme.

### **V.5.2 Essai de fissuration sur les soudures**

Le but de cet essai est de déterminer l'effet de l'opération de soudage sur la résistance à la fissuration sous contrainte des soudures de géomembranes PEHD ainsi que pouvoir différencier entre les différentes conditions de soudage.

### V.5.2.1 Sélection des soudures

Dans le cadre de notre investigation, seules les soudures jugées bonnes ainsi que les soudures jugées mauvaises suite à la variation de l'un de paramètres de soudage seront évaluées.

- Les soudures jugées bonnes :

**AAA, BAA, AAB, ABB, BAB, BBB, CAB, AAC, ABC, BAC, BBC et CAC.**

- Les mauvaises soudures :

**ABA, BBA, CAA, CBA, DAA, ACB, BCB, CBB, BCC, ACC, et CBC.**

### V.5.2.2 Les condition de l'essai développé

Les conditions suivantes de l'essai ont été prescrites suite aux résultats des essais préliminaires :

- Bain d'incubation : 70°C, Igepal CA-720;
- Contrainte appliquée : 5 Mpa;
- Emplacement d'entaille : au milieu de la soudure;
- Découpe : ASTM D638 type IV;
- Profondeur d'entaille : 30%;
- Nombre d'échantillons par soudures : 3

L'essai nécessite une longue préparation, la méthodologie suivante a été suivie :

- 1) **Préparation du bassin d'incubation** : la solution composée d'Igepal CA-720 et d'eau distillée est chauffée au moyen d'un circulateur d'immersion. 6 heures est le temps nécessaire pour que la température se stabilise à la température de l'essai. Pour accélérer le chauffage, on rajoute une autre circulateur démontable, le temps est réduit à 3 heures. Le bain est dimensionné pour tester 20 spécimens répartis en 4 supports.
- 2) **Préparation des échantillons** : découpage et perçage des éprouvettes, mesure de l'épaisseur de la partie étroite. Ces opérations nécessitent une temps de préparation de 1h30.
- 3) **Table de calcul des profondeurs d'entaille et des charges** : c'est un tableau Excel qui permet de calculer la charge correspondante à la contrainte qu'on doit appliquer, ainsi que la profondeur de l'entaille qu'on doit insérer sur l'échantillon (Annexe I).
- 4) **Réalisation des entailles** : il s'agit de l'étape qui nécessite le maximum de précision et de délicatesse. Cette opération nécessite 45 minutes pour entailler les 20 spécimens.
- 5) **Placement des éprouvettes sur les supports** : accrocher les échantillons au niveau des supports. Durée de cette opération : 30 minutes.
- 6) **Préparation des charges** : peser les charges correspondantes (45 minutes).
- 7) **Chargement des éprouvettes** : placer délicatement les charges sur les bras de levier, puis activer les chronomètres (15 minutes)
- 8) **Mesure des temps de rupture.**

### V.5.3 Résultats des essais sur les soudures

Les résultats des essais sont présentés sur les Tableaux V.10 et V.11.

**Tableau V.10 : Temps de rupture enregistrés sur les soudures jugées de bonne qualité par Sarazin (1998)**

<b>Soudures</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (N)</b>	<b>V (pi/min)</b>	<b>Temps de rupture (hr)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Valeur de la force de pelage (KN/m) (Sarazin, 1998)</b>
<b>AAA</b>	300	220	4.5	<u>45.26</u>	<i>1.04</i>	<u>22.95</u>
<b>BAB</b>	300	310	9	<u>47.36</u>	<i>8.76</i>	<u>22.50</u>
<b>BAC</b>	300	310	13.5	<u>45.3</u>	<i>6.06</i>	<u>22.97</u>
<b>AAB</b>	300	220	9	<u>45.96</u>	<i>0.66</i>	<u>24.11</u>
<b>ABC</b>	350	220	13.5	<u>53.7</u>	<i>5.59</i>	<u>23.63</u>
<b>CAB</b>	300	445	9	<u>55.73</u>	<i>1.37</i>	<u>23.92</u>
<b>CAC</b>	300	445	13.5	<u>45.4</u>	<i>3.22</i>	<u>23.36</u>
<b>AAC</b>	300	220	13.5	<u>48.66</u>	<i>4.73</i>	<u>24.55</u>
<b>ABB</b>	350	220	9	<u>47</u>	<i>3.09</i>	<u>24.30</u>
<b>BAA</b>	300	310	4.5	<u>59.73</u>	<i>9.71</i>	<u>22.69</u>
<b>BBC</b>	350	310	13.5	<u>72.9</u>	<i>1.56</i>	<u>24.71</u>
<b>BBB</b>	350	310	9	<u>45.56</u>	<i>8.46</i>	<u>24.49</u>



**Tableau V.11 Résultats des essais sur les soudures considérées de qualité plus médiocres par Sarazin (1998)**

<b>Soudures</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (N)</b>	<b>V (pi/min)</b>	<b>Temps de rupture (hr)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Valeur de la force de pelage (KN/m) (Sarazin, 1998)</b>
<b>CBB</b>	350	445	9	<u>44.66</u>	<u>10.3</u>	<u>24.77</u>
<b>ACC</b>	400	220	13.5	<u>45.46</u>	<u>0.33</u>	<u>22.40</u>
<b>BCB</b>	400	310	9	<u>44.8</u>	<u>7.84</u>	<u>24.37</u>
<b>ACB</b>	400	220	9	<u>40.16</u>	<u>4.10</u>	<u>22.31</u>
<b>BCC</b>	400	310	13.5	<u>36.73</u>	<u>3.44</u>	<u>23.28</u>
<b>CAA</b>	300	445	4.5	<u>32.16</u>	<u>4.35</u>	<u>23.52</u>
<b>ABA</b>	350	220	4.5	<u>30.56</u>	<u>6.99</u>	<u>22.88</u>
<b>CBA</b>	350	445	4.5	<u>26.26</u>	<u>7.89</u>	<u>23.02</u>
<b>BBA</b>	350	310	4.5	<u>22.1</u>	<u>1.19</u>	<u>23.29</u>
<b>DAA</b>	300	580	4.5	<u>36.06</u>	<u>8.76</u>	<u>22.77</u>
<b>CBC</b>	350	445	13.5	<u>44.56</u>	<u>1.46</u>	<u>23.76</u>

#### V.5.3.1 Analyse

Les résultats des essais de fissuration sous contrainte au niveau des soudures ont permis de distinguer les soudures suivant leurs conditions de soudage. En effet, les soudures considérées de bonne qualité offrent les meilleures résistances à la fissuration sous contrainte, les temps de rupture ont tous dépassé les 45 heures. Cependant, elles sont toutes de qualité différentes. Ainsi, en plus d'apporter une confirmation aux observations de Sarazin (1998), il est possible de différencier entre les bonnes soudures en terme de meilleure résistance à la fissuration sous contrainte.

Il faut noter que les coefficients de variation sont inférieurs à 10%. Nos résultats peuvent être jugés acceptables, ASTM suggérant un coefficient de variation inférieur à 15%. Le facteur dominant qui affecte la résistance à la fissuration sous contrainte semble être le temps de contact entre l'élément chauffant et les feuilles de géomembranes. La vitesse de soudage joue un rôle important dans le processus de fissuration surtout pour les hautes températures et pressions.

Les bonnes soudures qui offrent les meilleures résistances aux essais de pelage et de fissuration sous contraintes sont réalisés à des températures comprises entre 300 et 350°C à des vitesses assez élevées. Sarazin (1998) a montré qu'à cette plage de températures il n'y a pas de variation de cristallinité. Ces températures ne modifient pas la répartition phase amorphe phase cristalline du polymère. De plus, la vitesse de refroidissement a peu d'importance sur le taux de cristallinité. Donc les bonnes résistances se justifient par des taux de cristallinité semblables à ceux de la feuille vierge.

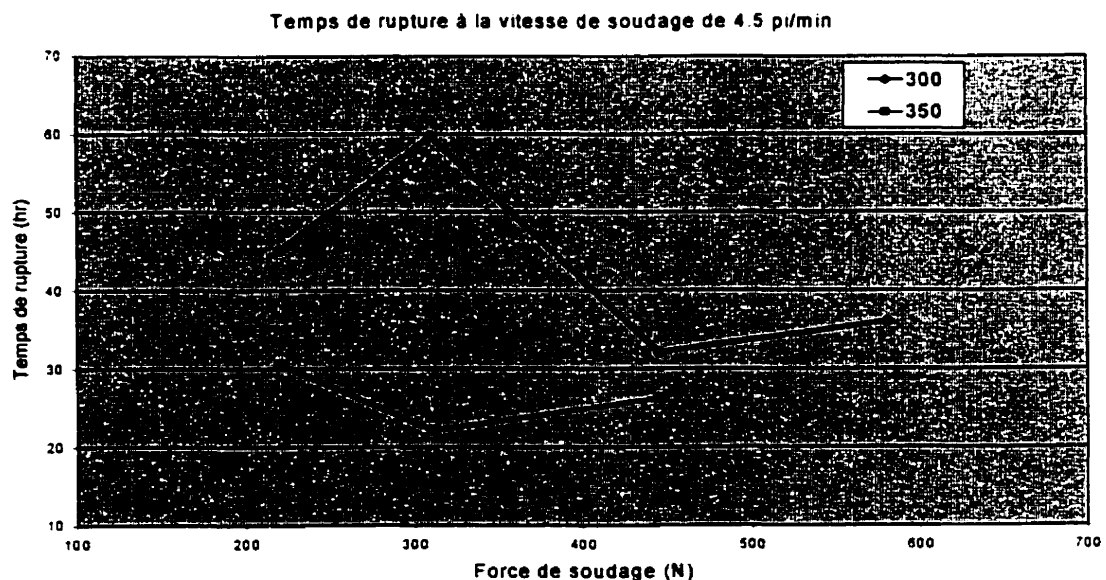
Les temps de rupture les plus courts, sont enregistrés sur les soudures ABA, BBA, CBA et CAA. Ces soudures présentent des ondulations ou des marques profondes des rouleaux. Le polymère a été surchauffé, de sorte que la profondeur de soudage est trop importante, ou bien surpressée par des forces trop élevées.

À faibles pression et vitesse, et pour une augmentation de 50°C, la soudure était jugée non convenable, les essais de fissuration vont dans le même sens, du fait qu'on remarque une chute du temps de rupture de 1.5 fois par rapport aux conditions initiales. Ceci pourrait s'expliquer par le temps de contact entre les feuilles et l'élément chauffant. Par contre pour les vitesses de 9 et 13.5 pi/min, les soudures ont gardé presque les mêmes valeurs voire une légère augmentation de leur résistance. À la pression de 220N, et pour une température de 400°C, les temps de rupture ont considérablement diminué.

La même situation est observée pour une pression de 310 N, où cette fois-ci les temps de rupture à faible vitesse ont énormément diminué à plus que 2.5 fois. Au contraire, à vitesse plus grande, surtout à 13.5 ft/min et à 350°C on a enregistré les meilleures résistances avec des temps de rupture de l'ordre de 73 heures.

Pour une élévation de pression de soudage à 445N et à une faible vitesse, on observe une chute du temps de rupture de 1,5 fois. Ceci pourrait s'expliquer par le gradient de pression assez élevé exercé par les lés sur la soudure en dépit d'une nette amélioration pour les hautes vitesses.

Il faut remarquer que les conditions combinant une forte vitesse avec une faible température (et une force pas trop importante) offrent les meilleurs résistances à la fissuration sous contrainte. Les Figures V.19a, V.19b, V.19c illustrent les temps de rupture en fonction des vitesses de soudage respectives.



**Figure V.19a : Les temps de rupture pour la vitesse de soudage 4.5 pi/min.**

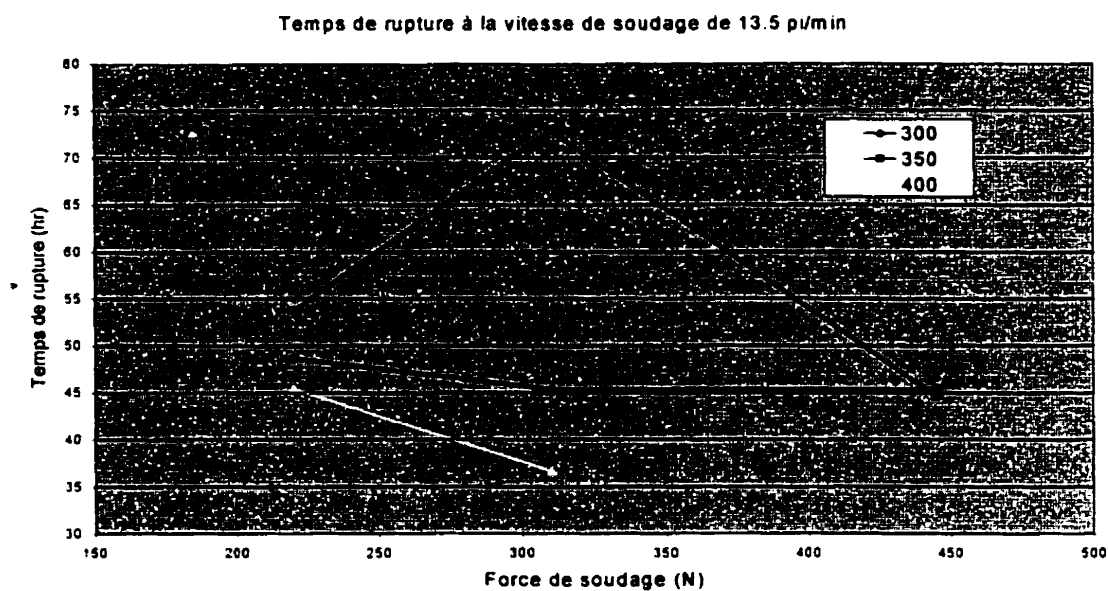


Figure V.19b : Les temps de rupture pour la vitesse de soudage 9 pi/min.

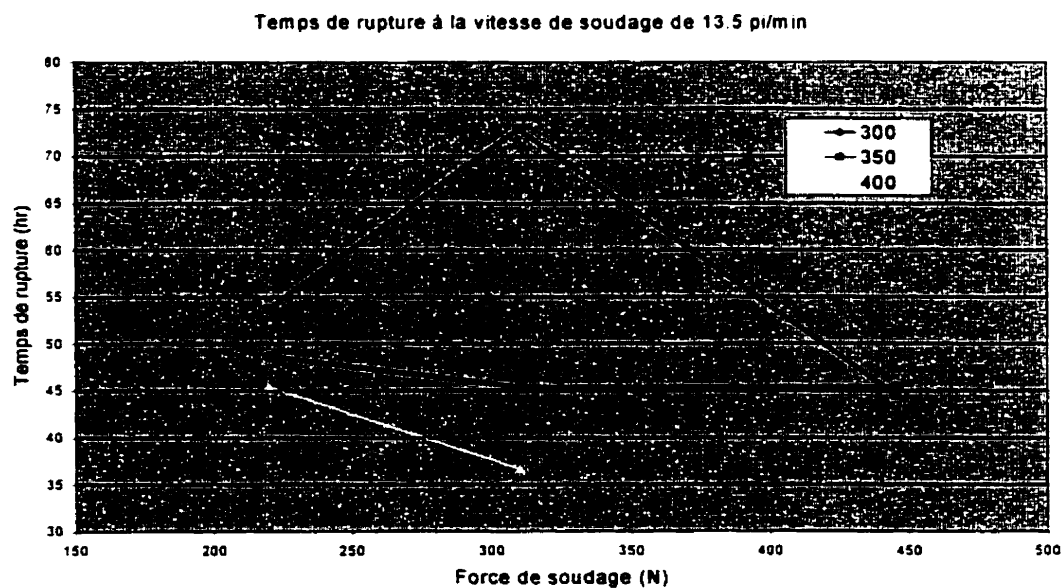


Figure V.19c : Les temps de rupture pour la vitesse de soudage 13.5 pi/min.

### V.5.3.2 Conclusion

Les conditions de soudage mises en œuvre dans cette étude ne peuvent être comparées à celles choisies sur une autre machine, puisque le design varie d'une soudeuse à une autre. Dans notre cas, les trois bonnes conditions de soudage qui offrent les meilleures résistances à la fissuration sous contrainte sont :

- BAA : 300°C, 310N, 4.5 pi/min
- BBC : 350°C, 310N, 13.5 pi/min
- CAB : 300°C, 445N, 9 pi/min

Le Tableau V.12, montre que la soudure BBC présente les meilleures conditions de soudage. Il s'agit des paramètres qui offrent les meilleures résistances aux essais de pelage, le meilleur aspect visuel, et une très bonne résistance à la fissuration sous contrainte.

**Tableau V.12 : Choix des meilleures paramètres de soudage**

Paramètres	BAA	BBC	CAB
Aspect de la ligne de soudure	Convenable	Convenable	Convenable
État de la perle de soudage d'après les sections droites	Non collée	Non collée	Non collée
Valeur de la force de pelage (KN/m)	22.69	24.71	23.92
Coefficient de variation des forces	6.19	0.81	1.46
Temps de rupture (hr)	60	73	55

Pour conclure, les valeurs des paramètres de soudage évoluent en fonction du temps. Cela semble surtout dû au mouvement de la machine. Ainsi on peut penser que l'utilisation sur site doit être assez délicate pour conserver les conditions fixées. La préparation du site et le placement des feuilles sont très importants pour éviter les variations des conditions de soudage et ainsi obtenir un soudage convenable.

## **VI. DISCUSSION**

### **VI.1 Le banc d'essai**

Les résultats obtenus ainsi que la littérature ont montré que les résultats varient d'un laboratoire à un autre, voire d'un support d'échantillons à un autre. Le banc d'essai développé semble s'adapter aux essais de fissuration sous contrainte sur les soudures. Certaines améliorations doivent y être portées surtout au niveau du contrôle de l'évaporation.

### **VI.2 Les paramètres de l'essai**

Les facteurs qui peuvent affecter le taux de croissance de la fissuration sont la taille et l'ampleur du défaut, la charge appliquée, la température et la résistance du matériau à la fracturation ainsi que la présence de produits chimiques, sans oublier l'habilité du manipulateur. Malgré les efforts visant à limiter l'effet de certains de ces paramètres, il s'est avéré que nous ne pouvions maîtriser l'ensemble des inconvénients déjà évoqués par la littérature.

- **La taille et l'épaisseur des échantillons**

Les résultats des essais réalisés sur trois différentes tailles d'éprouvettes ont montré que le temps de rupture est fonction de la largeur de la partie calibrée. En plus, l'épaisseur de l'échantillon est très significative, spécifiquement pour des matériaux à contrainte à la limite élastique assez élevée. Plus la section de l'éprouvette est épaisse, plus la résistance à la fissuration sous contrainte est importante.

ASTM ne prescrit pas une méthode spécifique pour la mesure de l'épaisseur de la portion étroite. D'après notre série d'essais, il est suggéré de mesurer l'épaisseur à l'aide d'un micromètre.

- **La réalisation de l'entaille**

C'est l'opération la plus délicate à contrôler, elle dépend des caractéristiques de l'éprouvette, de la qualité de la lame, de la machine à entaille ainsi que de l'opérateur. Les variations de profondeur d'entaille sont très difficiles à quantifier, des observations microscopiques par balayage sur des échantillons de soudures et de feuilles de géomembranes montrent des variations de profondeurs d'entaille comprises entre 2 et 10% de la profondeur réelle. Cette variation n'est pas en fonction directe de la profondeur et elle dépend du manipulateur et surtout de la présence d'irrégularités de surface.

La vitesse de descente de la lame est contrôlée par le manipulateur de l'essai. La force requise doit être graduelle et consistante. La réalisation d'entailles nécessite habilité et dextérité de ce dernier.

- **Le bain d'incubation**

La température du bain, la nature et la pureté de la solution active ont été amplement traitées par la littérature. La température est un facteur d'accélération du phénomène, les temps de rupture enregistrés à 70°C sont 3 à 5 fois plus rapides que ceux à 50°C indépendamment de la taille des échantillons. Il faut noter aussi que pour chaque température de test, doit correspondre un agent actif approprié.



- **La charge appliquée**

Le taux de contrainte est un paramètre important; en dessous d'une certaine charge critique, le phénomène ne se produit pas. Un autre facteur compliquant la tâche est que la force exercée sur le spécimen change quand les fissures croissent. Ceci est dû à la diminution de la surface de la section transversale.

### **VI.3 Les essais de résistance à la fissuration sous contrainte sans entaille**

Certes, l'essai sans entaille permet d'identifier le point d'initiation naturelle de la fissuration. Néanmoins, cet essai présente certaines limitations :

- Il enveloppe une combinaison de facteurs qui n'existent pas nécessairement dans l'environnement;
- Un essai relativement long surtout dans le cas de soudures faites à partir de bonnes résines;
- Il nécessite un système adéquat pour le contrôle de l'évaporation vues les hautes températures utilisées.

### **VI.4 Les essais de résistance à la fissuration sous contrainte avec entaille sur les feuilles**

Les résultats des essais réalisés sur les feuilles vierges ont été encourageants. Il est évident que l'augmentation de température accélère l'essai de deux à trois fois. Les micrographies réalisées sur les sections d'éprouvettes après rupture à 50 et 70°C ont montré un mode de rupture semblable.

Pour une entaille de profondeur égale à 60% de l'épaisseur totale introduite à la surface d'une éprouvette ASTM D638 type IV, soumise à une charge constante de 5 MPa dans une solution active composée de 5% d'Igepal CA-720 et 95% d'eau distillé maintenue à 70°C. Dans ces conditions, l'essai est accéléré d'environ 7 fois par rapport à l'essai standard ASTM D5397.

La réalisation d'une double entaille n'a pas accéléré l'essai. De même, il est à souligner que chaque température d'essai nécessite un agent actif spécifique.

#### **VI.5 Les essais de résistance à la fissuration sous contrainte avec entaille sur les soudures**

L'essai développé a permis de distinguer entre les conditions de soudage pour les soudures effectuées en laboratoire. Les résultats de l'essai confirment les suppositions de Sarazin (1998), en complétant et quantifiant les résultats.

Il faut noter que cet essai pouvait devenir un test de contrôle de qualité en raison de sa durée relativement courte (environ 3 jours) en considérant de plus que les soudures sur site sont souvent de qualité moins bonne à cause des conditions environnementales. Cependant, l'inconvénient majeur de l'essai pour l'instant est que les valeurs des temps de rupture dépendent du banc d'essai (support et machine à entaille). Mais il est clairement mis en évidence que l'essai apporte une grande précision sur la qualité des soudures par rapport à l'essai de pelage pour lequel toutes ces soudures donnaient des résultats analogues.

## **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

L'étude de la résistance à la fissuration sous contraintes au niveau des feuilles et des soudures des géomembranes PEHD est un sujet de recherche très vaste. Plusieurs phénomènes parfois surprenants, peuvent survenir selon la taille de l'échantillon, l'emplacement et la profondeur d'entaille, la composition et la température de la solution d'incubation, la charge appliquée et les paramètres du test. Les paramètres de structure (de la résine et d'extrusion) ont une influence prépondérante sur le comportement du matériau. En pratique, il faut rappeler qu'il est difficile de faire varier indépendamment une caractéristique pour en connaître l'influence précise.

Néanmoins, en s'appuyant sur la littérature, il était anticipé que la résistance à la fissuration sous contraintes pouvait s'avérer un paramètre pertinent pour évaluer la qualité des soudures et dans cette optique, notre programme de recherche a été entrepris.

En résultat de ce programme, trois thématiques principales inter-reliées ont été traitées et il apparaît opportun de conclure sur les résultats obtenus et les nouveautés technologiques issues de ces différents travaux.

A- En premier lieu, le développement d'une version accélérée de l'essai de fissuration standard a été conduit. Le facteur d'accélération optimal est de l'ordre de 7 par rapport à l'essai ASTM D5397. Ce développement a notamment nécessité la conception et la construction d'un nouveau banc d'essais et d'une machine à entailles, permettant l'ajustement aux paramètres d'essais retenus (entre autres la possibilité de pouvoir tester des échantillons de différentes tailles) ainsi que la mise à l'essai à haute température. En outre, la procédure de mise à l'essai a été modifiée : échantillons maintenant préparés au moyen de l'emporte-pièce ASTM D638 type IV et entaillés sur 60% de profondeur; application sous 5 MPa dans un bain d'IGEPAL CA-720 à 70°C.

Ce résultat est fort intéressant puisqu'il permet de réduire considérablement les temps des essais, à environ 3 jours et il semble pertinent de soumettre cette nouvelle méthodologie aux comités de normalisation. Toutefois, ce résultat sera à vérifier pour d'autres types de géomembranes.

La profondeur d'entaille reste un élément critique de la reproductibilité de l'essai. Elle dépend de plusieurs paramètres et des améliorations complémentaires à l'équipement développé sont suggérées.

B- Dans un second temps, et en résultat de tentatives infructueuses d'évaluation de la résistance à la fissuration sous contraintes de soudures en absence d'entaille, tel que le suggérait initialement la littérature, nous avons procédé au développement d'une nouvelle procédure d'essai de résistance à la fissuration sous contraintes des soudures de géomembranes PEHD. La nouvelle procédure comprend les paramètres d'essai suivants : échantillons préparés au moyen de l'emporte pièce ASTM D638 type IV et entaillés sur 30% de profondeur; application sous 5MPa dans un bain d'IGEPAL CA 720 à 70°C.

Là encore, nous suggérons de partager ce développement à la communauté de normalisation et scientifique afin qu'il soit mis en œuvre.

- C- Finalement, nous avons appliqué l'essai cité précédemment sur des soudures réalisées en laboratoire par Sarazin (1998). Les résultats obtenus ont permis de démontrer la pertinence de cet essai pour distinguer entre les différentes conditions de soudage et donc d'évaluer la résistance à la fissuration des soudures doubles par fusion, en se limitant toutefois aux trois variables du plan expérimental de Sarazin (vitesse, pression, température de la soudeuse). Les résultats démontrent notamment l'inaptitude de l'essai de pelage à prédire la résistance à long terme des soudures : les soudures sur-pressées et surchauffées jugées adéquates par l'essai de pelage présentent une résistance à la fissuration sous contraintes médiocre.

L'application de cette technique pourrait permettre de définir les spécifications optimales des conditions de soudage pour une machine donnée, avant son utilisation sur site, et ainsi intégrer les programmes d'assurance qualité.

Avant de confirmer le bien fondé de l'applicabilité de cet essai pour fins de contrôle qualité en chantier, sa reproductibilité sur d'autres soudures tels que des joints produits avec d'autres machines ou prélevés sur des sites, reste cependant à vérifier. La durée relativement longue de l'essai (2-3 jours) et ses coûts de mise en œuvre pourraient cependant demeurer des obstacles à sa diffusion large et rapide.

## BIBLIOGRAPHIE

APSE J.I., 1989 Polyethylene Resins for Geomembrane Applications, *Durability and aging of Geosynthetics*, ed. R.M. Koerner, Elsevier Applied Science, London, England, P 159-176.

ASTM D638-97, Test Method for Tensile Properties of plastics, *Annual Book of Standards*, Vol. 08.01, ASTM.

ASTM D883-88, Standard Definition of Terms Relating to Plastics, *Annual Book of Standards*, Vol. 08.01, ASTM.

ASTM D1693-97, Test Method for Environmental Stress Cracking of Ethylene Plastics, *Annual Book of Standards*, Vol. 08.01, ASTM.

ASTM D1822-93, Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials, *Annual Book of Standards*, Vol. 08.01, ASTM.

ASTM D3895-97, Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry, *Annual Book of Standards*, Vol. 08.02, ASTM.

ASTM D5397-95 Appendix, Standard Method Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test, *Annual Book of Standards*, Vol. 04.09, ASTM.

BAM, 1994, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Federal Institute for Materials Research and Testing), Laboratory 8.32, Landfill Engineering, February 1994, *guidelines for the Certification of Geomembranes as Component of Composite Liners for Municipal and Hazardous Waste Landfills and for Lining Contaminated Land*, Allemagne.

BERTHOLD J., BOHM L.L., ENDERLE H.F., GOBEL P., LUKER H., LECHT R., SCHULTE U., 1996, Advanced Polymerisation Process for Tailor Made Pipe Resins, *Plastics Rubber and composites Processing and applications*, Vol. 25, No 8, 1996, P368-372.

BOBSEIN L.R., 1999, Factors Influencing SP-NCTL Test Results, *Proceeding of the 13th GRI Seminar*, Jul 99, P 46-57.

BOURGEOIS R., BLACKET P., HMW-High-Density Polyethylene, *Modern Plastics Encyclopedia*, ed. Rosalind Juran, McGraw-Hill, Inc, New York, NY, 1989, Vol. 66, No. 11, P 75-76.

BRADY K.C., MCMAHON W., 1995, Thirty Year Ageing of Plastics, *Fifth International conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Singapore, September, P 1217-1222.

BROWN N., WARD A.L., LU X., HUANG Y., 1991, The Mechanism of Slow crack Growth in Polyethylene by an Environmental Stress Cracking Agent, *Polymer*, Vol.32, No.12, P2172-2178.

BROWN N., LU X., 1995, A Fundamental Theory for Slow Crack Growth in Polyethylene. *Polymer*, Vol.36, No.3, P 543-548.

BUDIMAN J., 1994, Effects of Temperature on Physical Behaviour of Geomembranes, *Fifth International conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Singapore, September, P 1093-1096.

CADWALLADER M.W., BURKINSHAW J.R., 1991, Molecular and Rheological Changes in Polyethylene Occuring from Heat Seaming HDPE Liners, *Procceding of Geosynthetics 91 Conference*, Atlanta GA, USA, February, P317-332.

CADWALLADER M.W., BARKER W.P., 1994, Quality Control of Flexible HDPE Liners, *Landfillings of Waste : Barriers, Edition 1994*, P345-363.

CADWALLADER M.W., JETT K., 1997, Current Quality issues in Polyethylene Geomembrane Installation: The Devil is in the Details, *Proceeding of the 11th GRI Conference, Field Installation of Geosynthetics*, Geosynthetic Research Institute, Drexel University, Philadelphia PA, USA, P86-103.

CADWALLADER M.W., 1998, Time to shit the Paradigm: The Cutting Edge of geomembrane QA/QC, *Geotechnical Fabrics Report*, April, P56-57.

CARLSON D.S., CHARRON R.M., WINFREE J.P., GIROUD J.P., MCLEARN M.E., 1993, Laboratry Evaluation of Geomembrane Seams, *Geosynthetics Conference 93*, Vancouver, Canada, Vol.3, P1543-1555.

CASSADY L., BRIGHT D.G., 1995, Durability of Geosynthetics Exposed to Nine Years of Natural Weathering, *Geosynthetics 95, Conference proceeding*, P841-852.

EPA, 1993, Quality Assurance and Quality Control for Waste Containment Facilities, Technical Guidance Document. *Environmental Protection Agency, Development DC 20460*, September, 157-160.



FAY J.J., KING III R.E., 1994, Antioxydants for Geosynthetic Resins and Applications, *GRI Conference Series, Geosynthetic Resins : Formulations and Manufacturing*, Edited by Hsuan Y.G et Koerner R.M, 1994, P77-95.

FISA B., 1994, *notes du cours Plastiques élastomères et composites*, École polytechnique de Montréal.

FLEISSNER M., 1998, Experience with a Full Notch Creep Test in Determining the Stress Crack Performance of Polyethylenes, *Polymer Engineering and science*, February, Vol.38, No.2, P330-340.

GM-13, 1998, Test Properties, Testing Frequency and Recommended Warrant for High Density Polyethylene (HDPE) Geomembranes.

HALSE Y.H., KOERNER R.M., LORD A.E., 1990a, Stress Cracking Morphology of Polyethylene (PE) Geomembrane Seams, *Geosynthetics : Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, Peggs I.D, Ed., American Society for testing and Materials, Philadelphia, 1990, P78-89.

HALSE Y.H., LORD A.E., KOERNER R.M., 1990b, Ductile-brittle transition time in polyethylene geomembrane sheet, *Geosynthetic testing for waste containment applications*, Koerner R.M. Editor, P94-109.

HSUAN Y.G., KOERNER R.M., KOERNER A.E., 1991, Effect of Outdoor Exposure on a High Density polyethylene Geomembrane, *Geosynthetics 91*, Atlanta, USA, Vol.1, P 287-302.

HSUAN Y.G., KOERNER R.M., LORD A.E., 1993, Stress Cracking Resistance of High Density Polyethylene Geomembranes, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.119, No.11, P 1840-1855.

HSUAN Y.G., KOERNER R.M., 1995, The Single Point Notched Constant Tensile Load Test : A Quality Control Test for Assessing Stress Crack Resistance, *Geosynthetics International*, Vol.2, No.5, P 831-843.

HSUAN G.Y., 1995, Testing for Stress Cracking in HDPE, *Geotechnical Fabrics Report*, August 95, P18-20.

HSUAN G.Y., 1998, Temperature Effect on the Stress Crack Resistance of High Density Polyethylene Geomembranes, *1998 Sixth International on Geosynthetics*, Vol.1, March 25-29, Atlanta, Georgia USA, P 371-374.

HSUAN Y.G., 2000, Data Base of Field Incidents Used to Establish HDPE Geomembrane Stress Crack Resistance Specification, *Geotextile and geomembranes* Vol.18, No.1, Elsevier science Ltd, P1-22.

HUY M.L., 1997, Vieillissement du polymère : Méthodes de prédiction, *Caoutchoucs & Plastiques*, No. 764, décembre, P63-67.

KINLOCH A.J., YOUNG R.J., 1983, Fracture Behaviour of Polymers, *Elsevier Applied Science Publishers*, England.

KOERNER R.M, HSUAN Y.G., LORD A.E., 1990, Long Term Durability and Ageing of Geomembranes, *Waste Containment systems : Construction, Regulation and performance*, Ed. Radolph Bonaparte, P106-134.

LAGARON J.M., PASTOR J.M., BERT J.K., 2000, Role of an active environment of use in an environmental stress crack resistance (ESCR) test in stretched polyethylene : A vibrational spectroscopy and a SEM study, *Polymer*, Vol.40, P1629-1636.

LANDER L.L., 1960, Environmental Stress Rupture of Polyethylene, *SPE Journal*, P1329-1332.

LANDRETH R.E., 1990, Chemical Resistance Evaluation of Geosynthetics Used in Waste Management Applications, *Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications*, Ed Koerner R.M., ASTM STP 1081, 1990, P3-11.

LEFEBVRE M., 1991, *Développement d'un essai d'impact pour la mesure des la fragilité des joints*, Mémoire de maîtrise, département de génie civil, École polytechnique de Montréal, Canada.

LESSARD M., 2000, Perspectives d'avenir du marché des géosynthétiques au Québec, *Les Géosynthétiques : Conjoncture, Enjeux et Perspectives*, Forum Géosynthétiques 2000, Recueil de Communication, Vol.2, Février 2000, Saint Hyacinthe, Canada.

LU X., ZHOU Z., BROWN N., 1994, Anisotropy of Slow crack growth in polyethylene Pipes, *Polymer Engineering and Science*, Jan, Vol.34, No.2, P109-115.

LU X., BROWN N., 1997, Abnormal Slow crack Growth in Polyethylene. *Polymer*, Vol.38, No.23, P5749-5753.

LUCAS J.C., SMITH F.L., MANDELKERN L., 1995, The Double Yield in the Tensile Deformation of the Polyethylenes, *Polymer Engineering and Science*, Vol.35, No.13, P549-554.

LUDERS G., 1998, Assesment of Seam Quality and Optimization of the Welding Process of HDPE Geomembranes, *6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, Vol.1 , P337-343.

LUSTIGER A., 1983, The Molecular Mechanism of slow crack Growth in Polyethylene, *Eighth Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, American Gaz association Arlington, Va., P54-65.

LUSTIGER A., ROSENBERG J., 1988, Predicting the Service Life of Polyethylene in Engineering Applications, *Durability and Aging of Geosynthetics*, Edited by Koerner, Elsevier Applied science , P195-211.

LUSTIGER A., 1996, Understanding Environmental Stress Cracking in Polyethylene, [www.devicelink.com](http://www.devicelink.com)

MAISONNEUVE C., PIERSON P., DUQUNNOI C., MORIN A., 1998, Assessing the Long-term Behavior of geomembranes in Multi-factor Environments, *Sixth International Conference on Geosynthetics*, IGS, Atlanta,USA, P355-358.

MANDELKERN L., 1993, *The Crystalline State*, Chapter 4 in Properties of Polymers, Second Edition, Mark, Eisnberg, Grassley, Mandelkern, Samulski, Koenig, and Wignall, American Chemical Society, Washington, DC, P145-200.

MARANDA L., 1995, *Comportement mécanique des soudures de géomembranes*, Mémoire de maîtrise, département de génie chimique, École Polytechnique de Montréal, Canada.

MARCOTTE M., 2000, *Les Géosynthétiques dans les ouvrages de confinement : définitions, sélection et mise en œuvre*, Cours stockage géologique des déchets, École Polytechnique de Montréal, hiver 2000.

PEGGS I.D., ROSE S., 1985, Practical Aspects of Polyethylene Geomembrane Seam Welding, *Geotechnical Fabrics Report*, février, P12-16.

PEGGS I.D., 1988, Failure and Repair of Geomembrane Lining System, *Geotechnical Fabrics Report*, November, P13-18.

PEGGS I.D., CARLSON D.S., 1990, Brittle fracture in Polyethylene Geomembranes. *Geosynthetic Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, Peggs I.D. Ed., American Society for testing and Materials, Philadelphia, 1990, P57-77.

PEGGS I.D., ROLLIN A., 1994, Seams in HDPE Geomembranes : The Quality Target. *Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and related Products*, Singapore, September, P949-952.

PEGGS I.D., 1999, Stress Cracking in HDPE Geomembranes : What it is and how to avoid it, Geosynthetics Preview section, [www.Geosynthetics.com](http://www.Geosynthetics.com).

PIERSON P., 1999, Durabilité des géomembranes utilisées dans les centres de stockage de déchets, *Rencontres Géosynthétiques*, 12-13 octobre, Bordeaux, France, Vol. I. P299-301.

PLASTIC PIPE, 1982, Published by Gas Research Institute, Vol.3, No.2, December.

PLASTIC PIPE INSTITUTE (PPI), 1993, *Engineering Properties of Polyethylene*, Chapter 3 of Geosynthetics, ed. R.M., Koerner, Elsevier Applied Science, London, England, P159-176.

PRASAD A., 2000, Environmental Stress Crack Polyethylene, Journal , *Polymeric Materials Science and engineering*, USA, Vol.81, Fall Meeting, P378-379.

QIAN R., LU X., BROWN N., 1993, The Effect of Concentration of an Environmental Stress Cracking Agent on Slow Crack Growth in Polyethylenes, *Polymer*, Vol.34, No.22, P4727-4731.

RHÔNE POULENC, 1990, *Surfactant and Specialities catalogue*.

RIEMSLAG A.C., 1997, *Crack Growth in Polyethylene*, Deft , the Netherlands : Deft University Press, P4-10.

RIGO J.M., COURARD L., DETAILLE I., FREDERIC B., BREUL B., LEGRAND C., 1999, Contribution a l'étude du phénomène de « Stress Cracking » par des mesures du temps d'induction à l'oxydation, *Rencontres Geosynthétiques, session Comportement, choix et essais des matériaux*. Bordeaux 1999, P30-35.

ROLLIN A.L., VIDOVIC A., DENIS R., MARCOTTE M., 1989, Evaluation of HDPE Geomembrane Field Welding Technics : Need to improve realibility of Quality Seams, *Proceeding of the Geosynthetics 89 Conference*, San Diego, USA, P443-455.

ROLLIN A.L., MARCOTTE M., LAFLEUR J., MLYNAREK J., 1993, The Use of Impact Test Procedure to Assess Seams' Brittleness, *Geosynthetics '93*, Vancouver, Canada, P1559-1573.

ROLLIN A.L., 1998, Les géomembranes en polyéthylène haute densité, l'alternative valable aux systèmes de sols argileux, *GéoGlobe*, No.1, P22-25.

ROLLIN A.L., LAFLEUR P., MARANDA L., 1998, The Influence of The Welding Parameters for HDPE Geomembranes, *6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, Vol.1, P331-335.

ROLLIN A.L., 2000, Durée de vie fonctionnelle des géotextiles et des géomembranes, *Les Géosynthétiques : Conjoncture, Enjeux et Perspectives, Forum Géosynthétiques 2000*, Recueil de Communication, Vol.2, Février 2000, Saint Hyacinthe, Canada.

ROSE L.J., CHANNEL A.D., FREY C.J., GAPACCIO G., 1994, Slow Crack Growth in Polyethylene : A novel Predictive Model Based on the Creep of Craze Fibrils . *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.54, P2119-2124.

ROWE R.K., 1998, Geosynthetics and the Minimization of Contaminant Migration through Barrier Systems Beneath Solid Waste, *Sixth International Conference on Geosynthetics*, IGS, Atlanta,USA. Keynote lecture, P27-102.

SARAZIN P., 1998, *Le soudage par fusion des géomembranes PEHD*, Département de génie Mécanique, École Polytechnique de Montréal, Canada.

STRUVE F., 1993, Consistent Wedge Welders, *Proceeding of the 7th GRI Seminar*, December, Philadelphia 14-15, P9-23

THOMAS R.W., DESCHEPPER B.W.,1993, Stress Crack Testing of Unnotched HDPE Geomembranes and Seams, *Proceeding of the 7th GRI Seminar*, December, Philadelphia 14-15, P116-125.

THOMAS R.W., KOLBASUK G..M., MLYNAREK J., 1995, Assessing the Quality of HDPE double Track Fusion Seams, *Sardinia 95 Landfill Conference*, P415-428.

THOMAS R.W., SIEBKEN J., 1997, Increasing the Temperature of the Notched Constant Tensile Load Environmental Stress Crack Resistance Test, *Geosynthetics '97, conference proceedings*, Vol.1, Long Beach, California USA, P191-200.

THOMAS R.W., 1998, Evaluating the Stress Crack Resistance of HDPE Seams, *Sixth International on Geosynthetics, conference proceedings*, Vol.1, Atlanta, USA, P349-3352.

TISINGER L.G., PEGGS I.D., HAXO H.E., 1990, Chemical Compatibility testing of geomembranes, *Geomembranes Identification and Performance Testing*, Ed. Rollin A., Rigo M., P 268-307.

TISINGER L.G., GIROUD J.P., 1993, The Durability of HDPE Geomembranes. *Geotechnical Fabrics Report*, September, Vol.11, No6, P 4-8.

TROTIGNON J.P., PIPERAUD M., VERDU J., DOBRACZYNSKI A., 1991, *Précis de matières plastiques, 5e Édition*, Afnor-Nathan, Paris, France.

VERDU J., 1984, *Vieillissement des plastiques*, Édition AFNOR Technique. ISBN :2-12-425111-2.

WARD A., LU X., BROWN N., 1990, Accelerated Test for Evaluating Slow Crack Growth of Polyethylene Copolymers in Igepal and air, *Polymer Engineering and Science*, Vol.30, No.18, P1175-1179.

WRIGHT D.C., 1996, *Environmental Stress Cracking of Plastics*, Ed. 1996, United Kingdom, P118-134.

YEH J.T., CHEN J.H., HONG H.S., 1994, Environmental Stress Cracking Behavior of Short-Chain Branch Polyethylenes in Igepal Solution Under a Constant Load, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.54, No.13, P2171-2186.



ZHOU Z., LU X., BROWN N., 1993, Effect of blending High-Density and linear Low-Density polyethylenes on slow crack growth, *Polymer*, Vol. 34, No. 12, Jun 1993.

ZHOU Z., BROWN N., 1994, The Effect of Orientation on Slow Crack Growth in High-Density Polyethylene, *Polymer*, Vol.35, No.9, P1948-1951.

ZOLLER U., DROZE Q., 1999, *Handbook of Detergent*, Surfactant Science Series, Vol.82, Ed. New York : Marcel Dekker, P30-33.

## **ANNEXE I**

### **TABLES DE CALCUL**

**(charges appliquées, profondeurs d'entailles et temps de rupture)**



Condition : 50°C, Igepal CO-630, profondeur d'entaille 40%																			
(%)	Stress	Largeur	Épaisseur	Facteur	Lollipop	M.A.	Charge	Épaisseur	valeur à	Temps									
of stress	at Yield	du dumbbell	après entaille	de	weight		Appliquée	totale	obtenir	de rupture									
at yield				correction					sur cadran										
				170g			lb	grammes		hr									
%	lb/po2	pouce	pouce	60%															
1	0,3 x 2850	x 0,125	x 0,059	x 0,6	0,374	pas	0	5	0,68	309,6	1,499	0,90	354						
2	0,3 x 2850	x 0,125	x 0,062	x 0,6	0,374	pas	0	5	0,72	327,0	1,575	0,94	341	M	335,40				
3	0,3 x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,6	0,374	pas	0	5	0,71	321,2	1,549	0,93	334	E	14,17				
4	0,3 x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,6	0,374	pas	0	5	0,71	321,2	1,549	0,93	320	CV	4,23				
5	0,3 x 2850	x 0,125	x 0,060	x 0,6	0,374	pas	0	5	0,69	315,4	1,524	0,91	328						
1	0,3 x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,6	0,374	pas	0	5	1,46	664,7	1,524	0,91	544						
2	0,3 x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,6	0,374	pas	0	5	1,46	664,7	1,524	0,91	552	M	548,00				
3	0,3 x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,6	0,374	pas	0	5	1,46	664,7	1,524	0,91	551	E	6,98				
4	0,3 x 2850	x 0,25	x 0,061	x 0,6	0,374	pas	0	5	1,49	676,4	1,549	0,93	561	CV	1,27				
5	0,3 x 2850	x 0,25	x 0,062	x 0,6	0,374	pas	0	5	1,52	698,0	1,575	0,94	532						
1	0,3 x 2850	x 0,5	x 0,061	x 0,6	0,374	pas	0	5	3,05	1366,7	1,549	0,93	587						
2	0,3 x 2850	x 0,5	x 0,063	x 0,6	0,374	pas	0	5	3,16	1433,3	1,600	0,96	592	M	599,60				
3	0,3 x 2850	x 0,5	x 0,061	x 0,6	0,374	pas	0	5	3,05	1366,7	1,549	0,93	577	E	22,23				
4	0,3 x 2850	x 0,5	x 0,061	x 0,6	0,374	pas	0	5	3,05	1366,7	1,549	0,93	628	CV	3,71				
5	0,3 x 2850	x 0,5	x 0,059	x 0,6	0,374	pas	0	5	2,95	1340,2	1,499	0,90	614						

Condition : 50°C, Igepal CO-630, profondeur d'entaille 60%																
	(%)	Stress	Largeur		Épaisseur			Facteur	Lollipop	M.A.	Charge		Épaisseur	valeur à	Temps	
	of stress	at Yield	du dumbbell		après entaille			de	weight		Appliquée		totale	obtenir	de rupture	
	at yield							correction						sur cadran		
	%	lb/po2	pouce		pouce			149,1g	42,3g =		lb	grammes	mm		hr	
1	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,47	215,4	1,549	0,62	183,9	
2	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,060	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,47	211,5	1,524	0,61	175,1	M 208,74
3	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,062	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,48	219,2	1,575	0,63	258,3	E 37,52
4	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,47	215,4	1,549	0,62	198	CV 17,98
5	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,063	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,49	223,1	1,600	0,64	228,4	
1	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,98	444,4	1,524	0,61	435	
2	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,98	444,4	1,524	0,61	397	M 412,40
3	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	0,98	444,4	1,524	0,61	408	E 18,66
4	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,061	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	1,00	452,1	1,549	0,62	394	CV 4,53
5	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,061	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	1,00	452,1	1,549	0,62	428	
1	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,063	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	2,11	956,8	1,600	0,64	363	
2	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,062	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	2,07	941,2	1,575	0,63	345	M 345,80
3	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,063	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	2,11	956,8	1,600	0,64	356	E 15,25
4	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,061	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	2,04	925,7	1,549	0,62	328	CV 4,41
5	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,060	x 0,4		0,329	plus	0,093	5	2,00	910,2	1,524	0,61	337	

Condition: Découpe ASTM D1822, 70°C, Igepal CA-720, Charge constante 5MPa																
	(%)	Stress	Largeur	Épaisseur		Facteur	Lollipop	M.A.	Charge		Épaisseur	valeur à	Temps			
	of stress	at Yield	du dumbbell	après entaille		de	weight		Appliquée		totale	obtenir	de rupture			
	at yield					correction						sur cadran				
	%	lb/po2	pouce	pouce	80%	149,1g lb	42,3g lb		lb	grammes	mm		hr			
1	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,060	x 0,8	0,329	plus 0,093	5	0,82	373,6	1,524	1,22	159,8			
2	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,059	x 0,8	0,329	plus 0,093	5	0,81	367,0	1,499	1,20	157,8	M		149,08
3	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,062	x 0,8	0,329	plus 0,093	5	0,85	386,8	1,575	1,26	142,9	E		11,36
4	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,060	x 0,8	0,329	plus 0,093	5	0,82	373,6	1,524	1,22	136,2	CV		7,62
	%	lb/po2	pouce	pouce	60%	lb	lb		lb	grammes	mm		hr			
1	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,059	x 0,6	0,329	plus 0,093	5	0,59	269,9	1,499	0,90	156,5	M		140,87
2	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,059	x 0,6	0,329	plus 0,093	5	0,59	269,9	1,499	0,90	136,2	E		14,00
3	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,061	x 0,6	0,329	plus 0,093	5	0,62	279,8	1,549	0,93	129,8	CV		9,94
	%	lb/po2	pouce	pouce	40%	lb	lb		lb	grammes	mm		hr			
1	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,062	x 0,4	0,329	plus 0,093	5	0,40	182,7	1,575	0,63	107,1	M		90,27
2	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,059	x 0,4	0,329	plus 0,093	5	0,38	172,8	1,499	0,60	87	E		15,46
3	0,3	x 2417	x 0,125	x 0,059	x 0,4	0,329	plus 0,093	5	0,38	172,8	1,499	0,60	76,7	CV		17,13



Condition: Découpe ASTM D638 type IV, 70°C, Igepal CA-720, Charge constante 5MPa												
(%)	Stress of stress at yield	Largeur du dumbbell	Épaisseur après entaille	Facteur de correction	Lollipop weight	M.A.	Charge Appliquée		Épaisseur totale	valeur à obtenir sur cadran	Temps de rupture	
at yield				149,1g	42,3g =		lb	grammes	mm		hr	
%	lb/po2	pouce	pouce	lb	lb			lb	mm			
1 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,061	x 0,8	0,329	0,093	5	1,72	781,8	1,549	1,24	132,3	
2 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,061	x 0,8	0,329	0,093	5	1,72	781,8	1,549	1,24	141,1	M 135,68
3 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,062	x 0,8	0,329	0,093	5	1,75	795,0	1,575	1,26	127,7	E 6,82
4 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,060	x 0,8	0,329	0,093	5	1,69	768,6	1,524	1,22	141,6	CV 5,03
%	lb/po2	pouce	pouce	lb	lb			lb	mm		hr	
1 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,061	x 0,6	0,329	0,093	5	1,28	581,0	1,549	0,93	123,4	M 129,97
2 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,061	x 0,6	0,329	0,093	5	1,26	581,0	1,549	0,93	122,7	E 11,99
3 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,061	x 0,6	0,329	0,093	5	1,28	581,0	1,549	0,93	143,8	CV 9,22
%	lb/po2	pouce	pouce	lb	lb			lb	mm		hr	
1 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,061	x 0,4	0,329	0,093	5	0,84	380,2	1,549	0,62	60,2	M 62,33
2 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,061	x 0,4	0,329	0,093	5	0,84	380,2	1,549	0,62	65,9	E 3,11
3 0,3 x 2417 x	x 0,25	x 0,059	x 0,4	0,329	0,093	5	0,81	367,0	1,499	0,60	60,9	CV 4,99



Condition : 50°C, Igepal CA-720, profondeur d'entaille 60%														
%	Stress of stress at at yield	Largeur du dumbbell	Épaisseur après entaille	Facteur de correction	Lollipop weight	M A	Charge		Épaisseur totale	valeur à obtenir sur cadran	Temps de rupture			
							lb	grammes						
												149,1g	42,3g =	
%	lb/po2	pouce	pouce	lb	lb				mm	hr				
1 0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	0,47	215,4	1,549	0,62	Sup 500	
2 0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	0,47	215,4	1,549	0,62	Sup 500	
3 0,3	x 2850	x 0,125	x 0,062	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	0,48	219,2	1,575	0,63	Sup 500	
4 0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	0,47	215,4	1,549	0,62	Sup 500	
5 0,3	x 2850	x 0,125	x 0,063	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	0,49	223,1	1,600	0,64	Sup 500	
1 0,3	x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	0,98	444,4	1,524	0,61	Sup 500	
2 0,3	x 2850	x 0,25	x 0,063	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	1,03	467,7	1,600	0,64	Sup 500	
3 0,3	x 2850	x 0,25	x 0,060	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	0,98	444,4	1,524	0,61	Sup 500	
4 0,3	x 2850	x 0,25	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	1,00	452,1	1,549	0,62	Sup 500	
5 0,3	x 2850	x 0,25	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	1,00	452,1	1,549	0,62	Sup 500	
1 0,3	x 2850	x 0,5	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	2,04	925,7	1,549	0,62	Sup 500	
2 0,3	x 2850	x 0,5	x 0,062	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	2,07	941,2	1,575	0,63	Sup 500	
3 0,3	x 2850	x 0,5	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	2,04	925,7	1,549	0,62	Sup 500	
4 0,3	x 2850	x 0,5	x 0,061	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	2,04	925,7	1,549	0,62	Sup 500	
5 0,3	x 2850	x 0,5	x 0,060	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	2,00	910,2	1,524	0,61	Sup 500	

Condition: 50°C, Igepal CO-630, 20% entaille des deux côtés														
	(%)	Stress	Largeur	Épaisseur		Facteur	Lollipop	M.A.						
	of stress	at Yield	du dumbbell	après entaille		de	weight			Charge	Épaisseur	valeur à	Temps	
	at yield					correction				Appliquée	totale	obtenir	de rupture	
						149,1g	42,3g =					sur cadran		
	%	lb/po2	pouce	pouce	60%	lb	lb			lb	grammes	mm	hr	
1	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,059	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	0,71	322,1	1,499	1,20	Sup 500
2	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	0,74	333,7	1,549	1,24	Sup 500
3	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	0,74	333,7	1,549	1,24	Sup 500
4	0,3	x 2850	x 0,125	x 0,061	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	0,74	333,7	1,549	1,24	Sup 500
1	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,062	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	1,54	700,6	1,575	1,26	Sup 500
2	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,061	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	1,52	688,9	1,549	1,24	Sup 500
3	0,3	x 2850	x 0,25	x 0,062	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	1,54	700,6	1,575	1,26	Sup 500
1	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,059	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	2,98	1352,7	1,499	1,20	Sup 500
2	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,059	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	2,98	1352,7	1,499	1,20	Sup 500
3	0,3	x 2850	x 0,5	x 0,060	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	3,03	1376,0	1,524	1,22	Sup 500
Condition: 70°C, Igepal CA-720, 20% entaille des deux côtés														
	(%)	Stress	Largeur	Epaisseur		Facteur	Lollipop	M.A.						
	of stress	at Yield	du dumbbell	après entaille		de	weight			Charge	Épaisseur	valeur à	Temps	
	at yield					correction				Appliquée	totale	obtenir	de rupture	
						149,1g	42,3g =					sur cadran		
	%	lb/po2	pouce	pouce	60%	lb	lb			lb	grammes	mm	hr	
1	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,062	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	1,75	795,0	1,575	1,26	Sup 500
2	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,060	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	1,69	768,6	1,524	1,22	Sup 500
3	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,062	x 0,6	0,329	plus 0,093	:	5	1,30	590,9	1,575	1,26	Sup 500

Comparaison entre les deux bancs d'essais																	
	(%)	Stress	Largeur	Épaisseur			Facteur	Lollipop	M.A.	Charge			Épaisseur	valeur à	Temps		
	of stress	at Yield	du dumbbell	après entaille			de	weight		Appliquée			totale	obtenir	de rupture		
	at yield						correction							sur cadran			
	%	lb/po2	pouce	pouce	60%		170g			lb	grammes		mm		hr		
1	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,061	x 0,6	-	0,374	plus	0	: 5	1,25	568,6	1,549	0,93	134	M	134,67
2	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,061	x 0,6	-	0,374	plus	0	: 5	1,25	568,6	1,549	0,93	142	E	7,02
3	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,061	x 0,6	-	0,374	plus	0	: 5	1,25	568,6	1,549	0,93	128	CV	5,22
	%	lb/po2	pouce	pouce	60%		lb		lb		lb	grammes	mm		hr		
1	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,061	x 0,6	-	0,329	plus	0,093	: 5	1,28	561,0	1,549	1,24	123,4	M	129,97
2	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,061	x 0,6	-	0,329	plus	0,093	: 5	1,28	561,0	1,549	1,24	122,7	E	11,99
3	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,061	x 0,6	-	0,329	plus	0,093	: 5	1,28	561,0	1,549	1,24	143,8	CV	9,22



Essai préliminaires sur les soudures :soudure sans identification														
Découpe ASTM D638 type IV, 70°C, Inopal CA-720, charge 5MPa, 20% entaille sur la soudure (position A)														
(%)	Stress of stress at Yield at yield	Largeur du dumbbell	Épaisseur après entaille	Facteur de correction	Lollipop weight	M.A	Charge Appliquée	Épaisseur totale	valeur à obtenir sur cadran	Temps de rupture				
				170g			lb	grammes	mm	hr				
1	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,8	0	5	3,06	1388,2	2,743	2,19	M	238	214,67	
2	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,8	0	5	3,06	1388,2	2,743	2,19	E	192	22,03	
3	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,8	0	5	3,06	1388,2	2,743	2,19	CV	216	10,28	
Découpe ASTM D638 type IV, 70°C, Inopal CA-720, charge 5MPa, 40% entaille sur la soudure (position A)														
(%)	Stress of stress at Yield at yield	Largeur du dumbbell	Épaisseur après entaille	Facteur de correction	Lollipop weight	M.A	Charge Appliquée	Épaisseur totale	valeur à obtenir sur cadran	Temps de rupture				
				170g			lb	grammes	mm	hr				
1	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,6	0	5	2,27	1032,6	2,743	1,65	M	110	102,00	
2	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,6	0	5	2,27	1032,6	2,743	1,65	E	100	7,21	
3	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,6	0	5	2,27	1032,6	2,743	1,65	CV	96	7,07	
Découpe ASTM D638 type IV, 70°C, Inopal CA-720, charge 5MPa, 60% entaille sur la soudure (position A)														
(%)	Stress of stress at Yield at yield	Largeur du dumbbell	Épaisseur après entaille	Facteur de correction	Lollipop weight	M.A	Charge Appliquée	Épaisseur totale	valeur à obtenir sur cadran	Temps de rupture				
				170g			lb	grammes	mm	hr				
1	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,4	0	5	1,49	677,1	2,743	1,10	M	336	336,67	
2	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,4	0	5	1,49	677,1	2,743	1,10	E	329	8,02	
3	0,3 x 2417 x	0,25 x	0,108 x	0,4	0	5	1,49	677,1	2,743	1,10	CV	345	2,38	

Suite:Essai préliminaires sur les soudures :soudure sans identification																
Découpe ASTM D638 type I, 70°C, Isopal CA-720, charge 5MPa, 60% entaille sur la soudure (position A)																
	(%)	Stress	Largeur	Épaisseur		Facteur	Lollipop	M A								
	of stress	at Yield	du dumbbell	après entaille		de	weight				Charge	Épaisseur	valeur à	Temps		
	at yield					correction					Appliquée	totale	obtenir	de rupture		
	%	lb/po2	pouce	pouce	40%	170g					lb	grammes	mm	sur cadran	hr	
1	0,3	x 2417	x 0,5	x 0,108	x 0,4	0,374	pas	0	:	5	3,06	1388,2	2,743	1,10	341	M 369,00
2	0,3	x 2417	x 0,5	x 0,108	x 0,4	0,374	pas	0	:	5	3,06	1388,2	2,743	1,10	402	E 30,81
3	0,3	x 2417	x 0,5	x 0,108	x 0,4	0,374	pas	0	:	5	3,06	1388,2	2,743	1,10	384	CV 8,35
Découpe ASTM D638 type I, 70°C, Isopal CA-720, charge 5MPa, 60% entaille sur la soudure (position B)																
	%	lb/po2	pouce	pouce	40%	lb					lb	grammes	mm		hr	
1	0,3	x 2417	x 0,5	x 0,108	x 0,4	0,374	pas	0	:	5	3,06	1388,2	2,743	1,10	432	M 437,33
2	0,3	x 2417	x 0,5	x 0,108	x 0,4	0,374	pas	0	:	5	3,06	1388,2	2,743	1,10	419	E 21,50
3	0,3	x 2417	x 0,5	x 0,108	x 0,4	0,374	pas	0	:	5	3,06	1388,2	2,743	1,10	481	CV 4,92







Suite <u>Essai sur la Soudure BBC, 70 degré, Igepal CA-720, Charge 5 Mpa.</u>																						
	%		lb/po2		pouce		pouce		50%		lb		lb		lb ou grammes		mm		hr			
1	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,5	-	0,329	plus	0,093	:	5	2,13	966,2	3,048	1,52	62,6	M	66,90
2	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,5	-	0,329	plus	0,093	:	5	2,13	966,2	3,048	1,52	69,1	E	3,72
3	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,5	-	0,329	plus	0,093	:	5	2,13	966,2	3,048	1,52	69	CV	5,57
	%		lb/po2		pouce		pouce		45%		lb		lb		lb ou grammes		mm		hr			
1	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,45	-	0,329	plus	0,093	:	5	1,91	867,4	3,048	1,37	127,1	M	122,95
2	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,45	-	0,329	plus	0,093	:	5	1,91	867,4	3,048	1,37	118,8	E	5,87
																					CV	4,77
	%		lb/po2		pouce		pouce		40%		lb		lb		lb ou grammes		mm		hr			
1	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,4	-	0,329	plus	0,093	:	5	1,69	768,6	3,048	1,22	118,9	M	110,30
2	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,4	-	0,329	plus	0,093	:	5	1,69	768,6	3,048	1,22	114,3	E	11,15
3	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,4	-	0,329	plus	0,093	:	5	1,69	768,6	3,048	1,22	97,7	CV	10,11



Suite:Essai sur la Soudure DCC, 70 degré, Igepal CA-720, Charge 5 Mpa.																
%	lb/po2	pouce	pouce	50%	lb	pas	lb	lb	lb ou grammes	mm	hr					
1	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,5	0,329	pas	0,093	5	1,95 883,9	2,794	1,40	99,2	M	102,17		
2	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,5	0,329	pas	0,093	5	1,95 883,9	2,794	1,40	106,1	E	3,55		
3	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,5	0,329	pas	0,093	5	1,95 883,9	2,794	1,40	101,2	CV	3,47		
%	lb/po2	pouce	pouce	45%	lb	pas	lb	lb	lb ou grammes	mm	hr					
1	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,45	0,329	pas	0,093	5	1,75 793,3	2,794	1,28	84,1	M	82,90		
2	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,45	0,329	pas	0,093	5	1,75 793,3	2,794	1,28	81,7	E	1,70		
													CV	2,05		
%	lb/po2	pouce	pouce	40%	lb	pas	lb	lb	lb ou grammes	mm	hr					
1	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	1,55 702,8	2,794	1,12	106,6	M	99,95		
2	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,4	0,329	pas	0,093	5	1,55 702,8	2,794	1,12	93,3	E	9,40		
													CV	9,41		



Soudure CAC													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	ps	lb	ps	lb	ou grammes	mm	hr	
1	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,122	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,05	1384,2	3,099	2,17	48,1 M 45,40
2	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,124	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,10	1407,3	3,150	2,20	44,9 E 0,62
3	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,124	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,10	1407,3	3,150	2,20	45,2 CV 1,38
Soudure ABC													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	ps	lb	ps	lb	ou grammes	mm	hr	
1	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,122	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,05	1384,2	3,099	2,17	51,4 M 53,70
2	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,121	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,02	1372,7	3,073	2,15	57,1 E 3,00
3	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,122	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,05	1384,2	3,099	2,17	52,6 CV 5,80
Soudure AAB													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	ps	lb	ps	lb	ou grammes	mm	hr	
1	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,119	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,97	1349,7	3,023	2,12	45,3 M 45,97
2	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,119	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,97	1349,7	3,023	2,12	45,7 E 0,31
3	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,118	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,95	1338,1	2,997	2,10	45,9 CV 0,88
Soudure CAB													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	ps	lb	ps	lb	ou grammes	mm	hr	
1	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,119	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,97	1349,7	3,023	2,12	55,4 M 55,73
2	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,118	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,95	1338,1	2,997	2,10	55,9 E 0,78
3	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,118	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,95	1338,1	2,997	2,10	54,9 CV 1,37
Soudure AAC													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	ps	lb	ps	lb	ou grammes	mm	hr	
1	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,124	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,10	1407,3	3,150	2,20	48,8 M 48,67
2	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,124	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,10	1407,3	3,150	2,20	50,9 E 2,30
3	0,3 x 2417 x	0,25	x 0,124	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	3,10	1407,3	3,150	2,20	48,3 CV 4,73

Soudure ABB													
	%	lb/pc2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	0,093	5	lb ou grammes	mm	hr
1	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
2	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,119	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
3	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,118	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
Soudure BAA													
	%	lb/pc2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	0,093	5	lb ou grammes	mm	hr
1	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,116	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
2	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,112	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
3	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,113	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
Soudure BBC													
	%	lb/pc2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	0,093	5	lb ou grammes	mm	hr
1	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
2	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
3	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,120	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
Soudure BBB													
	%	lb/pc2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	0,093	5	lb ou grammes	mm	hr
1	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,103	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
2	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,102	x	0,7	0,329	pas	0,093	5
3	0,3	x	2417	x	0,25	x	0,102	x	0,7	0,329	pas	0,093	5

Essai sur les Soudures Jugées mauvaises par Sarazin (1998)														
70 degré, Igepal CA-720, Charge 5 Mpa, 30% entaille														
	(%)	Stress of stress at Yield	Largeur du dumbbell	Épaisseur après entaille	Facteur de correction	Lollipop weight	M.A.	Charge Appliquée	Épaisseur totale	valeur à obtenir	Temps de rupture			
		at yield			149,1g	42,3g =				sur cadran				
<b>Soudure CBB</b>														
	%	lb/psi <sup>2</sup>	pouce	pouce	70%	lb	lb	lb ou grammes	mm		hr			
1	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,119	x 0,7	0,329	0,093	5 2,97 1349,7	3,023	2,12	39,7	M	44,67	
2	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,120	x 0,7	0,329	0,093	5 3,00 1361,2	3,048	2,13	48,9	E	4,64	
3	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,119	x 0,7	0,329	0,093	5 2,97 1349,7	3,023	2,12	46,4	CV	10,40	
<b>Soudure ACC</b>														
	%	lb/psi <sup>2</sup>	pouce	pouce	70%	lb	lb	lb ou grammes	mm		hr			
1	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,120	x 0,7	0,329	0,093	5 3,00 1361,2	3,048	2,13	45,4	M	45,47	
2	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,120	x 0,7	0,329	0,093	5 3,00 1361,2	3,048	2,13	45,9	E	0,40	
3	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,120	x 0,7	0,329	0,093	5 3,00 1361,2	3,048	2,13	45,1	CV	0,89	
<b>Soudure BCB</b>														
	%	lb/psi <sup>2</sup>	pouce	pouce	70%	lb	lb	lb ou grammes	mm		hr			
1	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,112	x 0,7	0,329	0,093	5 2,80 1269,0	2,845	1,99	48,8	M	44,80	
2	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,112	x 0,7	0,329	0,093	5 2,80 1269,0	2,845	1,99	42,2	E	3,52	
3	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,112	x 0,7	0,329	0,093	5 2,80 1269,0	2,845	1,99	43,4	CV	7,85	
<b>Soudure ACB</b>														
	%	lb/psi <sup>2</sup>	pouce	pouce	70%	lb	lb	lb ou grammes	mm		hr			
1	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,111	x 0,7	0,329	0,093	5 2,77 1257,5	2,819	1,97	42	M	40,17	
2	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,110	x 0,7	0,329	0,093	5 2,74 1246,0	2,794	1,96	39,7	E	1,65	
3	0,3	x 2417	x 0,25	x 0,113	x 0,7	0,329	0,093	5 2,82 1260,5	2,870	2,01	36,5	CV	4,11	

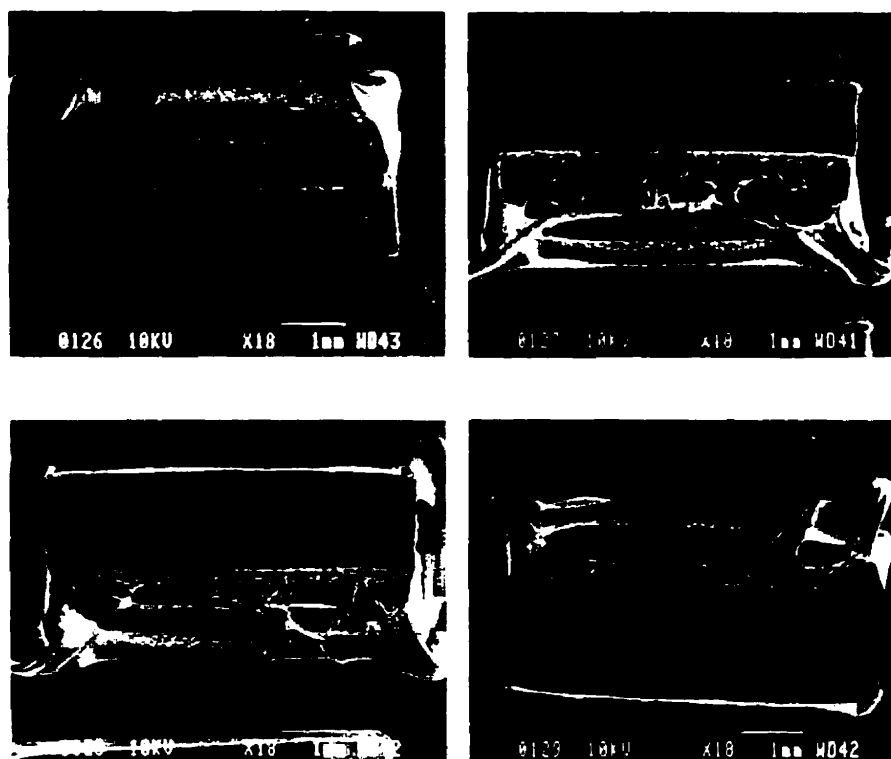
Soudure BCC													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	lb	lb ou grammes	mm	hr		
1	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,116	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,90 1315,1	2,946	2,06	35,3 M	36,73
2	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,116	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,90 1315,1	2,946	2,06	37,7 E	1,27
3	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,116	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,90 1315,1	2,946	2,06	37,2 CV	3,48
Soudure CAA													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	lb	lb ou grammes	mm	hr		
1	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,104	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,59 1176,8	2,642	1,85	32,8 M	32,17
2	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,105	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,62 1188,4	2,667	1,87	33,3 E	1,40
3	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,104	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,59 1176,8	2,642	1,85	30,8 CV	4,36
Soudure ABA													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	lb	lb ou grammes	mm	hr		
1	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,104	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,59 1176,8	2,642	1,85	32,9 M	30,57
2	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,104	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,59 1176,8	2,642	1,85	28,7 E	2,14
3	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,103	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,57 1165,3	2,616	1,83	30,1 CV	7,00
Soudure CBA													
%	lb/ps2	pouce	pouce	70%	lb	pas	lb	lb	lb ou grammes	mm	hr		
1	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,101	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,52 1142,3	2,565	1,80	28,5 M	26,27
2	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,100	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,49 1130,8	2,540	1,78	24,4 E	2,07
3	0,3 x 2417	x 0,25	x 0,100	x 0,7	0,329	pas	0,093	5	2,48 1130,8	2,540	1,78	25,9 CV	7,90



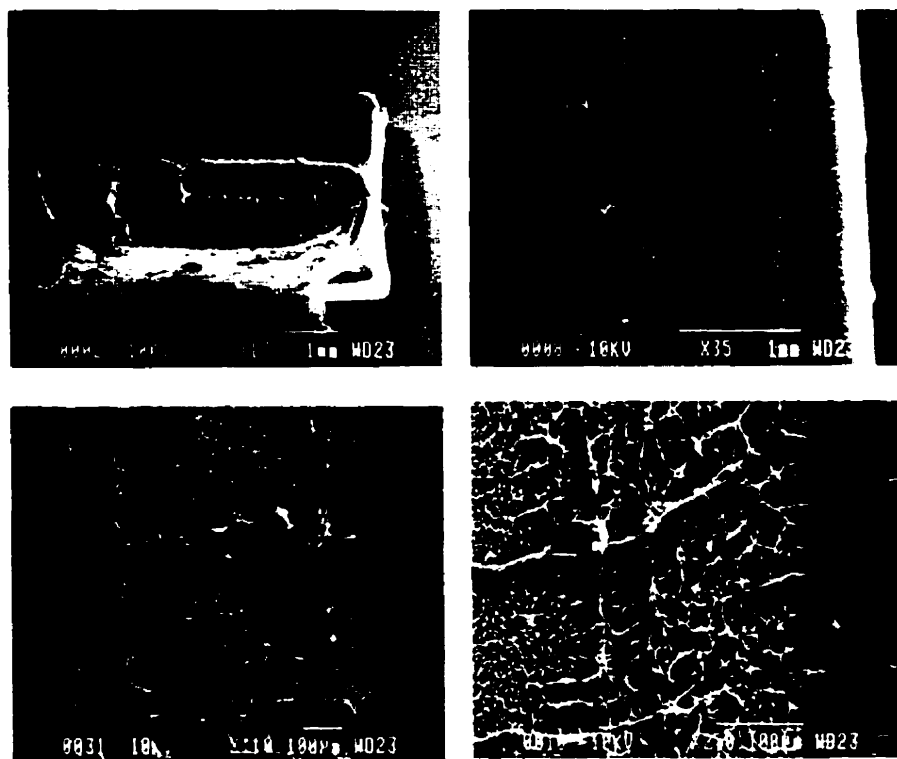
Soudure BBA																
	%		lb/po2	pouce	pouce	70%	lb		lb		lb ou grammes	mm		hr		
1	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,099	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,47 1119,2	2,515	1,76	22,4	M 22,10
2	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,096	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,39 1084,7	2,438	1,71	21,9	E 0,26
3	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,100	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,49 1130,8	2,540	1,78	22	CV 1,20
Soudure DAA																
	%		lb/po2	pouce	pouce	70%	lb		lb		lb ou grammes	mm		hr		
1	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,105	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,62 1188,4	2,667	1,87	33,5	M 38,07
2	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,104	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,59 1176,8	2,642	1,85	39,8	E 3,16
3	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,106	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,84 1199,8	2,692	1,88	35,1	CV 8,77
Soudure CBC																
	%		lb/po2	pouce	pouce	70%	lb		lb		lb ou grammes	mm		hr		
1	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,110	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,74 1248,0	2,794	1,96	44,3	M 44,57
2	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,110	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,74 1248,0	2,794	1,96	44,2	E 0,55
3	0,3	x	2417	x 0,25	x 0,110	x 0,7	0,329	plus	0,093	:	5	2,74 1248,0	2,794	1,96	45,2	CV 1,24

## **ANNEXE II**

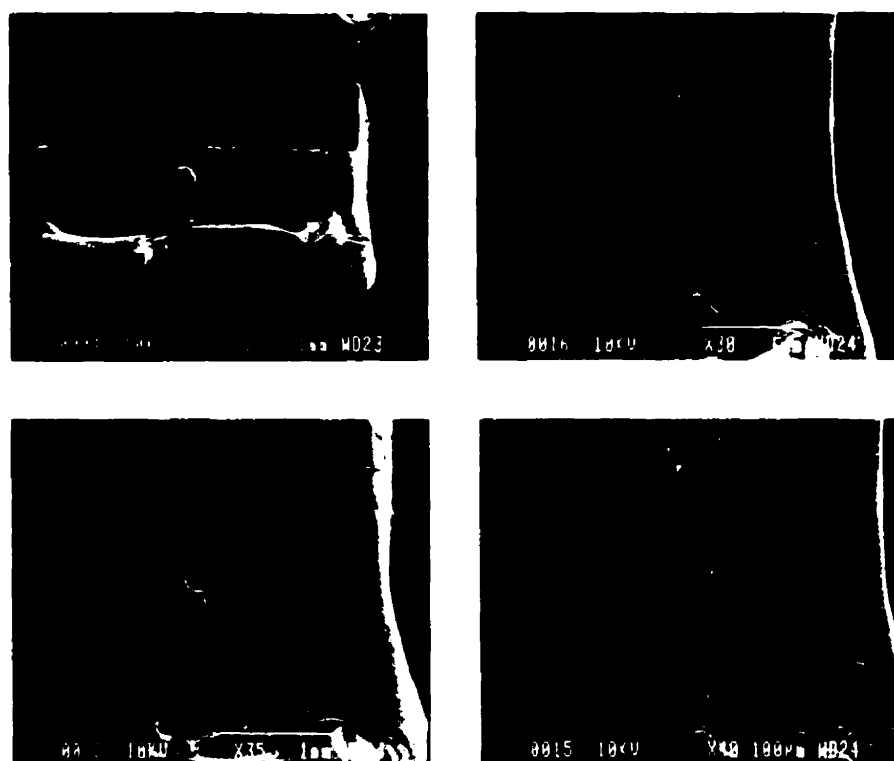
**Micrographies : Observations au microscope électronique par balayage**



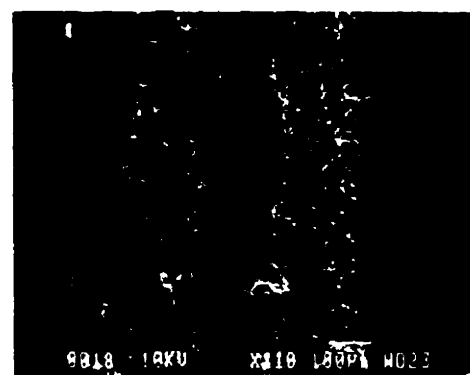
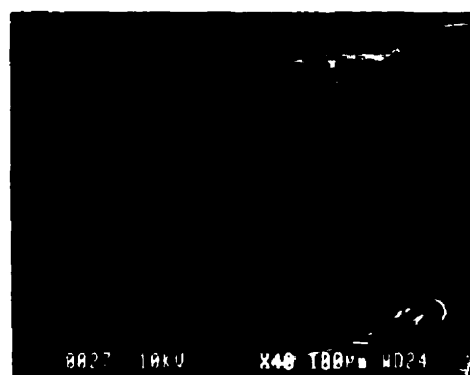
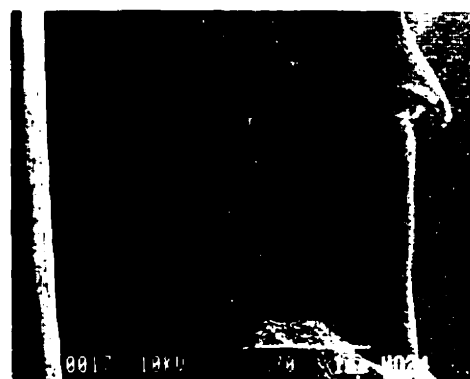
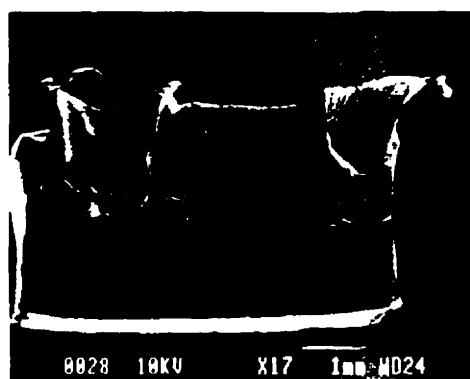
**Morphologie de la section transversale à différentes profondeurs  
d'entaille (30, 40, 50 et 60% de l'épaisseur totale)**



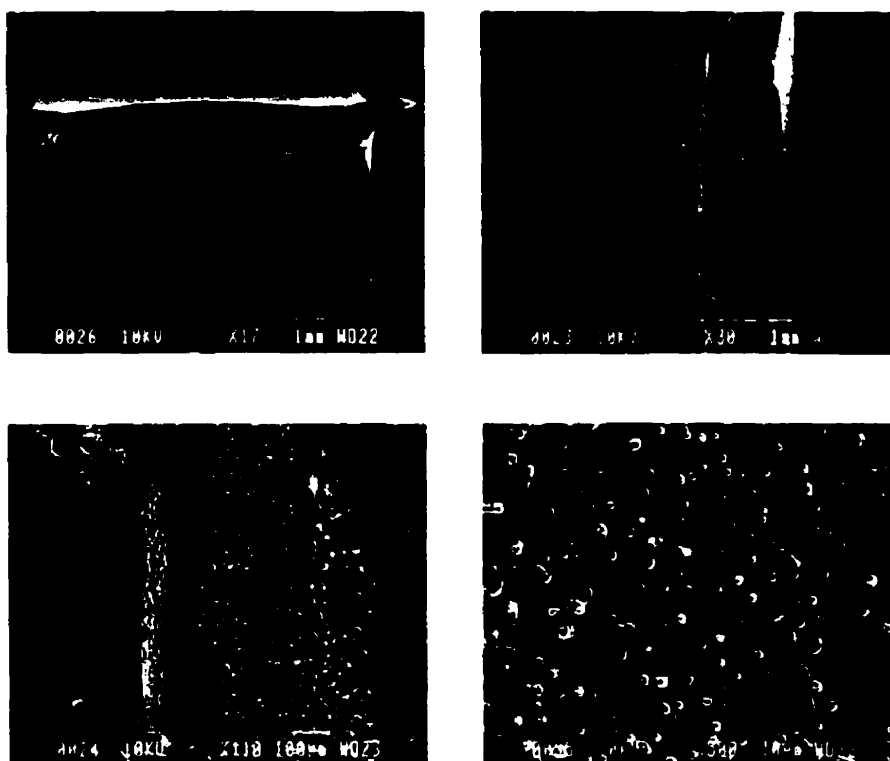
**Morphologie de la section transversale de rupture d'une soudure à 30%  
de profondeur d'entaille**



**Morphologie de la section transversale de rupture d'une soudure à 40%  
de profondeur d'entaille**

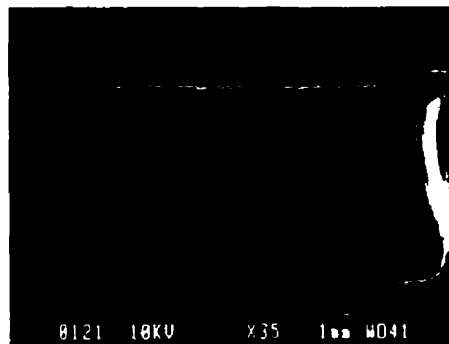


**Morphologie de la section transversale de rupture d'une soudure à 50%  
de profondeur d'entaille**

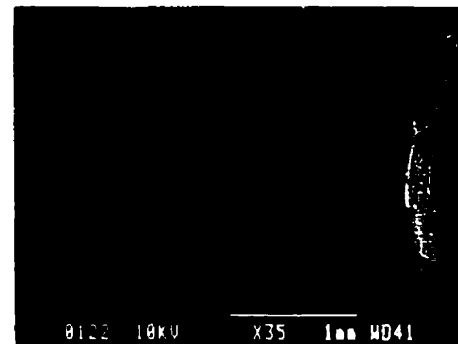


**Morphologie de la section transversale de rupture d'une soudure à 60%  
de profondeur d'entaille**

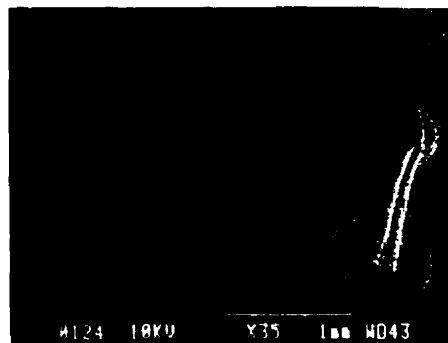
a)



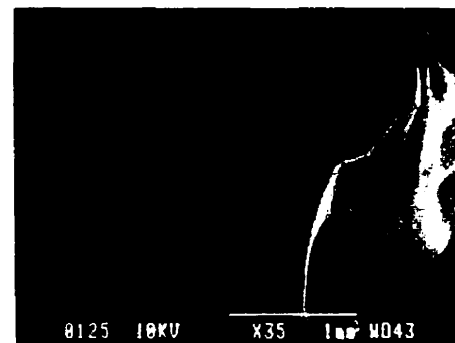
b)



c)



d)



**Types de rupture observées à 70°C : une rupture quasi fragile pour 40 et 50% de la contrainte à la limite élastique (a et b) et une rupture ductile pour 70 et 80% de la contrainte à la limite élastique**